



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV ELEKTROTECHNOLOGIE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC TECHNOLOGY

VLIV OKOLNÍCH PODMÍNEK NA RECYKLACI SOLÁRNÍCH MODULŮ

THE INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF THE RECYCLING OF SOLAR MODULES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Filip Langer

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.

BRNO 2021

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Elektrotechnická výroba a management**

Ústav elektrotechnologie

Student: Bc. Filip Langer

ID: 195239

Ročník: 2

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Vliv okolních podmínek na recyklaci solárních modulů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte analýzu současného stavu recyklace v České republice a v zahraničí. Seznamte se s recyklačními procesy fotovoltaických modulů. Vytvořte vzorky vhodné pro testování v klimatické komoře. Studujte vliv různých klimatických podmínek a chemických rozpouštědel na Ethylen Vinyl Acetát, který v solárních modulech působí jako izolace. Naměřené výsledky vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 24.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.

doc. Ing. Petr Bača, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Práce je soustředěna na experimenty, jejichž cílem je oddělit ochranné sklo z tenkovrstvého solárního modulu. To by mohlo vést k méně nákladné a více účinné recyklaci. Oddělení skla se snažíme dosáhnout roztavením ethylen vinyl acetátové fólie, která v modulu slouží jako izolace a pojivo. Experimenty probíhají ve vysokoteplotní sušičce a vysokoteplotní vakuové peci na vzorcích tenkovrstvého solárního modulu, který byl za účely experimentů nařezán vodním paprskem na stejně velké vzorky. Prvotní experimenty v sušičce a vakuové peci se snaží najít hodnotu tavení ethylen vinyl acetátu v testovaných vzorcích modulu. Tato hodnota je postupným měřením určena na 340 °C. Při vystavení této teplotě dojde k dostatečnému roztavení ethylen vinyl acetátu natolik, aby bylo možno sklo minimální fyzickou silou odebrat. Proces je doprovázen destrukcí hořením tedlarové vrstvy a tvorbou zplodin. Po určení teploty tání následují pokusy ve vakuu a dusíkové atmosféře, jejichž cílem je zjistit, jak se projeví na tavení ethylen vinyl acetátu. Vystavení vzorku teplotě 340 °C ve vakuu nevedlo k novým výsledkům. Vystavení vzorku teplotě 340 °C v dusíkové atmosféře předešlo hoření a dosáhlo stejného roztavení ethylen vinyl acetátu a způsobilo menší množství uvolněných zplodin. Ačkoliv nedošlo k hoření, tedlarová vrstva byla vysokou teplotou opět zničena. Dále se části vypařeného ethylen vinyl acetátu usadily na povrchu vzorku ve formě poprachu. Další experimenty pozorovaly nasákavost modulu a vliv dostupných rozpouštědel na proces tavení. Bylo zjištěno, že modul je schopen nasáknout přibližně 2 % acetonu, 0,4 % isopropyl alkoholu a 0,11 % destilované vody v poměru k vlastní hmotnosti. Měření rozpouštědly nasáklých modulů ve vakuové peci neprokázaly rozdíly v procesu tavení. Pozorování vzorků ethylen vinyl acetátu z modulu, rozteklé z modulu po pokusu ve vakuové peci a z poprachu usazeném na povrchu modulu po měření v dusíkové atmosféře prokázalo, že odebraný poprach je skutečně ethylen vinyl acetát.

Klíčová slova

Fotovoltaický modul, fotovoltaický článek, recyklace, materiály, legislativa, ethylen vinyl acetát

Abstract

This thesis is focused on experiments, goal of which is to separate protective glass apart from thin layer solar panel. This could lead to less expensive and more efficient recycling. We try to achieve the separation of the glass by thawing ethylene vinyl acetate layer, which serves as insulant and bonding material. Experiments are concluded in high temperature dryer and high temperature vacuum oven on samples of thin layer solar panel, which is for the purposes of experiments cut into same pieces by water jet

cutting machine. The initiatory experiments in dryer and oven are to determine value of ethylene vinyl acetate thaw point in tested samples of panel. The thaw point is determined to be 340 °C. When exposed to this temperature, the ethylene vinyl acetate thaws enough for glass to be able to be extracted with minimal physical strength. The process is accompanied by fire destruction of tedlar layer and creation of exhaust gases. Following experiments in vacuum and nitrogen environment are to test their influence on thawing process. Exposing sample to temperature of 340 °C in vacuum led to no new results. Exposing sample to temperature of 340 °C in nitrogen environment prevented fire and achieved same level of thawing of ethylene vinyl acetate while creating less exhaust gases. Even though the fire was prevented, tedlar layer was still destroyed by the high temperature. Furthermore, particles of evaporated ethylene vinyl acetate condensed on surface of module in form of dust. Following experiments studied absorption of panel and influence of accessible solvents on thawing process. It was determined that panel is able to absorb approximately 2 % of acetone, 0,4 % of isopropyl alcohol and 0,11 % of distilled water in its own weight. Experiments with modules soaked in these solvents proved no new results in thawing process. By observing samples of ethylene vinyl acetate taken from module, thawed out of module after experiment in vacuum oven and dust condensed on surface of module after experiment in nitrogen environment, it was proven that the condensed dust is indeed ethylene vinyl acetate.

Keywords

Photovoltaic panel, photovoltaic cell, recycling, materials, legislation, ethylene vinyl acetate

Bibliografická citace

Langer, F. *Vliv okolních podmínek na recyklaci solárních modulů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2020. 49 s. Semestrální práce. Vedoucí práce: Ing. Kristýna Jandová, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>Bc. Filip Langer</i>
VUT ID studenta:	<i>195239</i>
Typ práce:	<i>Diplomová práce</i>
Akademický rok:	<i>2020/21</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Vliv okolních podmínek na recyklaci solárních modulů</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 23. května 2021

podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mé vedoucí práce, Ing. Kristýně Jandové, která mi byla více než ochotná s prací pomoci. Dále bych chtěl poděkovat mé rodině: mému tátovi za pomoc, bez které bych se neobešel, mámě za povzbudivá slova a bráchovi za vždy potřebné rozptýlení. Dále můj vděk patří mým bližním, kteří mi byli v těžkých časech nápomocní. V neposlední řadě děkuji panu Petránkovi, zástupci firmy ASEKOLSolar za poskytnutí informací cenných informací, Ing. Petru Maule za poskytnutí nezbytných vzorků pro mé pokusy a všem členům fakulty elektrotechniky a informatiky, kteří mi s mou prací v sebemenší míře pomohli.

V Brně dne: 23. května 2021

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	10
SEZNAM TABULEK.....	11
ÚVOD	12
1. RECYKLACE FOTOVOLTAICKÉHO MODULU V ČR A ZAHRANIČÍ.....	13
1.1 LEGISLATIVA.....	13
1.1.1 Směrnice Evropského parlamentu a rady 2012/19/EU	13
1.1.2 Zákon č. 185/2001 sb. O odpadech a o změně některých dalších zákonů.....	13
1.1.3 Vyhláška č. 352/2005 Sb. Vyhláška o podrobnostech nakládání s elektrozařízeními a elektroodpady a o bližších podmínkách financování nakládání s nimi	14
1.1.4 Zákon č. 165/2012 Sb. Zákon o podporovaných zdrojích energie	14
1.2 RECYKLACE V ČESKU	14
1.3 RECYKLACE V ZAHRANIČÍ.....	15
2. RECYKLACE FOTOVOLTAICKÉHO MODULU.....	17
2.1 RECYKLOVANÉ ČÁSTI SOLÁRNÍHO MODULU.....	17
2.2 METODY RECYKLACE.....	17
2.2.1 Termická recyklace	17
2.2.2 Mechanicko-chemická recyklace	18
2.2.3 Laserová recyklační metoda	19
2.3 PROČ SE SOLÁRNÍ MODULY SVÁŽÍ K RECYKLACI.....	19
3. FOTOVOLTAICKÝ MODUL.....	20
3.1 PRINCIP FOTOVOLTAICKÉHO MODULU	20
3.2 TŘETÍ GENERACE FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ.....	21
3.3 TYPY FOTOVOLTAICKÝCH ČLÁNKŮ	21
3.3.1 Monokrystalické solární články využívající křemík.....	21
3.3.2 Polykrystalické solární články využívající křemík.....	22
3.3.3 Amorfni solární články využívající křemík	23
3.3.4 Solární články využívající telurid kadmia	24
3.3.5 Solární články využívající arsenid galia	24
3.3.6 Solární články využívající CIS/CIGS	25
3.3.7 Organické solární články	26
3.4 VÝROBA FOTOVOLTAICKÉHO ČLÁNKU	27
3.4.1 Výroba monokrystalických článků	27
3.4.2 Výroba polykrystalického článku	28
3.4.3 Výroba tenkovrstvých (amorfních) článků	28
3.5 STRUKTURA FOTOVOLTAICKÝCH MODULŮ.....	29
3.5.1 Solární moduly použité pro experimenty.....	30
4. EVA (ETHYLEN VINYL ACETÁT).....	32
4.1.1 Složení.....	32
4.1.2 Vlastnosti	32
4.1.3 Využití ethylen vinyl acetátu	32
4.1.4 Využití ethylen vinyl acetátu v solárních člancích	33

5. PRAKTICKÁ ČÁST	34
5.1 EXPERIMENT 1 – VLIV VYSOKÉ TEPLoty	34
5.1.1 Provedená měření	34
5.1.2 Vyhodnocení experimentu	35
5.2 EXPERIMENT 2 – VLIV VYSOKÝCH TEPLot	35
5.2.1 Provedená měření	36
5.2.2 Vyhodnocení experimentu	38
5.3 EXPERIMENT 3 – VLIV DOSTUPNÝCH ROZPOUŠTĚDEL	38
5.3.1 Provedená měření	39
5.3.2 Vyhodnocení experimentu	41
5.4 EXPERIMENT 4 – VLIV VYSOKÉ TEPLoty A DUSÍKU	42
5.4.1 Provedená měření	42
5.4.2 Vyhodnocení experimentu	44
5.5 EXPERIMENT 5 – POZOROVÁNÍ VZORKŮ ELEKTRONOVÝM MIKROSKOPEM	44
5.5.1 Rozbor vzorku ethylen vinyl acetátu z modulu	45
5.5.2 Rozbor roztaveného ethylen vinyl acetátu	49
5.5.3 Pozorování poprachu usazeného na povrchu modulu po měření v keramické peci v dusíkové atmosféře	53
5.5.4 Vyhodnocení experimentu	58
6. ZÁVĚR.....	60
LITERATURA.....	61
ZDROJE OBRÁZKŮ	65

Seznam symbolů a zkratek

Zkratky:

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
VUT	Vysoké učení technické v Brně
EU	Evropská Unie
EEZ	elektrické a elektrotechnické zařízení
UV	ultra violet (ultra fialové)
EVA	ethylen vinyl acetát
WEEE	waste electrical and electronic equipment
JPEA	Japan Photovoltaic Energy Association
SEM	scanning electron microscope

Symboly:

<u>Veličina</u>	<u>Název</u>	<u>Jednotka</u>
W_z	šířka zakázaného pásu	[elektronvolt]
eV	elektronvolt	[joule]
W	výkon	[watt]
$^{\circ}C$	teplota	[stupeň celsia]
m	délka	[metr]
kg	hmotnost	[kilogram]
Wh	energie	[watthodina]
p	tlak	[pascal]

SEZNAM OBRÁZKŮ

2.1	Poškozený solární modul	19
3.1	Schéma struktury fotovoltaického článku z krystalického křemíku	20
3.2	Křemíkový monokrystalický článek.....	22
3.3	Polykrystalický solární modul	23
3.4	Kalkulačka Casio s amorfním krystalovým článkem	23
3.5	3D model roveru Opportunity	25
3.6	Stavba dvouvrstvého organického solárního článku	27
3.7	Stavba monokrystalického solárního modulu.....	29
3.8	Vzorek monokrystalického solárního modulu použitý pro experimenty.....	30
3.9	Vzorek tenkovrstvého solárního modulu použitý pro experimenty.....	31
4.1	Chemický vzorec ethylen vinyl acetátu.....	32
5.1	Výsledek měření č.3	35
5.2	Výsledek měření č.1 – vytažený vzorek.....	36
5.3	Výsledek měření č.4 – holý solární článek.....	37
5.4	Výsledek měření č.1	42
5.5	Výsledek měření 1: vcelku odebrané sklo.....	43
5.6	Detail vzorku ethylen vinyl acetátu odebraného z modulu o velikosti 415 μm x 415 μm.....	45
5.7	Detail vzorku ethylen vinyl acetátu z modulu pro spektroskopii	46
5.8	Grafické znázornění výsledku spektrometrie	47
5.9	Detail vzorku ethylen vinyl acetátu odebraného z modulu vizuálně znázorňující prvkové složení zjištěné spektrometrií	48
5.10	Detail roztaveného vzorku ethylen vinyl acetátu o velikosti 415 μm x 415 μm.....	49
5.11	Detail vzorku roztaveného ethylen vinyl acetátu pro spektroskopii.....	50
5.12	Grafické znázornění výsledku spektrometrie	51
5.13	Detail vzorku roztaveného ethylen vinyl acetátu vizuálně znázorňující prvkové složení zjištěné spektrometrií	52
5.14	Detail poprachu usazeného na povrchu modulu po měření v keramické peci v dusíkové atmosféře o velikosti 415 μm x 415 μm.....	53
5.15	Detail vzorku poprachu usazeného na povrchu modulu po měření v keramické peci v dusíkové atmosféře se třemi vybranými segmenty pro provedení spektrometrie	54
5.16	Grafické znázornění výsledku spektrometrie pro segment 1.....	55
5.17	Grafické znázornění výsledku spektrometrie pro segment 2.....	56
5.18	Grafické znázornění výsledku spektrometrie pro segment 3.....	57
5.19	Detail vzorku poprachu usazeného na povrchu modulu po měření v keramické peci v dusíkové atmosféře vizuálně znázorňující prvkové složení zjištěné spektrometrií	58

SEZNAM TABULEK

1.1	Přehled kolektivních systémů v České republice	15
5.1	Přehled hmotností namáčených vzorků pro měření 2.....	39
5.2	Přehled hmotností namáčených vzorků pro měření 3.....	40
5.3	Přehled hmotností namáčených vzorků pro měření 4.....	40
5.4	Přehled hmotností namáčených vzorků pro měření 5.....	41
5.5	Tabulka hodnot zjištěných spektrometrií	47
5.6	Tabulka hodnot zjištěných spektrometrií	51
5.7	Tabulka hodnot zjištěných spektrometrií pro segment 1	55
5.8	Tabulka hodnot zjištěných spektrometrií pro segment 2.....	56
5.9	Tabulka hodnot zjištěných spektrometrií pro segment 3.....	57

ÚVOD

Tématem této diplomové práce je vliv okolních podmínek na recyklaci solárních modulů. Tato práce je zaměřena na zjednodušení recyklačního procesu, větší ekologičnost a snahu o zlepšení třídění a opětovné použití surovin. Toto téma jsem si zvolil, protože dle mého názoru fotovoltaické moduly netvoří dostatečně sledovaný a používaný způsob výroby elektrické energie.

Tato práce je rozdělena do tří částí. První kapitola vyjmenovává části legislativy, které jsou s recyklací fotovoltaických modulů spojeny, a zabývá se stavem recyklace fotovoltaických modulů v České republice a zahraničí. Druhá kapitola se zabývá materiály, které je možno získat recyklací solárních modulů, metodami, které se pro recyklaci fotovoltaických modulů používají a důvody, proč jsou fotovoltaické moduly sváženy k recyklaci. Třetí kapitola se zabývá principem fungování fotovoltaického článku, typy fotovoltaických článků, způsoby které se k výrobě fotovoltaických článků používají, popisuje obecnou strukturu solárního modulu a popisuje solární moduly, které byly použity pro experimenty diplomové práce. Ve čtvrté kapitole je popsán ethylen vinyl acetát.

V praktické části je popsáno několik experimentů, jejichž cílem bylo najít nejjednodušší způsob oddělení skla od solárního článku odstraněním ethylen vinyl acetátové složky, která tyto části spojuje. Tím by se dala zajistit lepší výnosnost a úspěšnost recyklace, což by vedlo k nižším nákladům na suroviny. Z literatury jsem vyčetl, že by toho mohlo být dosaženo pomocí vysokých teplot, vysokého tlaku či použití různých rozpouštědel.

1. RECYKLACE FOTOVOLTAICKÉHO MODULU V ČR A ZAHRANIČÍ

V České republice je legislativou povinnost o účasti na recyklaci fotovoltaických modulů nařízena výrobcí, distributorovi, spotřebiteli a dalším subjektům zapojeným do zpětného odběru a následného zpracování. Z toho důvodu je nezbytné se jí v diplomové práci zabývat.

1.1 Legislativa

Povinnosti vztahující se k fotovoltaickým modulům jsou určeny národní legislativou. Česká republika, jakožto člen Evropské unie, má povinnost řídit se evropskými směrnici a zpracovat je do legislativy.

1.1.1 Směrnice Evropského parlamentu a rady 2012/19/EU

Jedná se o směrnici vydanou Evropské rady a parlamentu o odpadních elektrických a elektrotechnických zařízeních, v originále „Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE)“.

Tato směrnice nově zařazuje solární moduly do 4. kategorie EEZ – Spotřební elektrotechnika a solární moduly. Dále nařizuje aby sběr, skladování, přeprava, zpracování a recyklace solárních modulů probíhal v souladu s přístupem dbajícím na ochranu životního prostředí, lidského zdraví a maximálního zachování surovin. Dále ukládá odpovědnost financování historického odpadu firmám působícím na globálním trhu v moment, kdy došlo ke generaci odpadu.

Směrnice se také snaží o propojení všech subjektů, jmenovitě výrobce, distributora, spotřebitele a subjekty zapojené do zpětného odběru a zpracování, kteří se podílí na životním cyklu solárního modulu. Tím si snaží dosáhnout lepší ochrany životního prostředí. Směrnice ale nenastavuje žádné minimální hranice, v jakých má tato spolupráce probíhat. Tato povinnost připadá na jednotlivé členské země, a tudíž se tyto podmínky mohou v každé členské zemi lišit.

Česká republika má také jako jedna z mála zemí výjimku uvádět na trh solární moduly vyrobené z toxických látek jako kadmium nebo galium [1].

1.1.2 Zákon č. 185/2001 sb. O odpadech a o změně některých dalších zákonů

Zákon 185/2001 Sb. postupně do české legislativy zapracovává směrnice vydané Evropskou Unií. Poslední novelizace se týká zákona č. 223/2015 Sb. Čl. 2.

Paragraf §37p stanovuje, že u solárních modulů vyrobených po 1. lednu 2013 zodpovídá za financování recyklace výrobce. Tento recyklační poplatek se u všech modulů vyrobených od roku 2012 automaticky započítává do ceny modulu. Tyto finanční prostředky nemohou být předmětem nařízení, provedením výkonu rozhodnutí

či exekuce a nezahrnují se do majetkové podstaty výrobce. Dále tento paragraf stanovuje provozovatele solárních elektráren, jejichž moduly byly uvedeny na trh před 1. lednem 2013 jako osoby zodpovědné za jejich ekologickou recyklaci prostřednictvím kolektivního systému. Tuto povinnost jim bylo nařízeno splnit postupným financováním nejpozději do 1. ledna 2019. Paragraf §66 dále stanovuje postihy pro podnikající fyzické a právnické osoby v případě, že zákony nedodrží [2].

1.1.3 Vyhláška č. 352/2005 Sb. Vyhláška o podrobnostech nakládání s elektrozařízeními a elektroodpady a o bližších podmínkách financování nakládání s nimi

Tato vyhláška zpracovává tři směrnice Evropské unie: Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/96/ES ze dne 27. ledna 2003 o odpadních elektrických a elektronických zařízeních, směrnice Evropského parlamentu a Rady 2003/108/ES ze dne 8. prosince 2003, kterou se mění směrnice 2002/96/ES o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (OEEZ) a směrnice Evropského parlamentu a Rady 2002/95/ES ze dne 27. ledna 2003 o omezení používání některých nebezpečných látek v elektrických a elektronických zařízeních. Paragraf §14b této vyhlášky stanovuje, že výše minimálního příspěvku na financování nakládání s odpadem ze solárních modulů vyrobených před 1. lednem 2013 se odvozuje z jeho hmotnosti. Výpočetní vzorec se vypočítá

$$M = P * K$$

M – hmotnost solárních modulů instalovaných v solární elektrárně pro účely výpočtu minimální výše příspěvku uvedenou v kg

P – výkon solární elektrárny podle licence na výrobu elektřiny v této solární elektrárně vydané Energetickým regulačním úřadem uvedený ve wattech (Wp)

K – průměrná hmotnost solárního modulu připadající na jednotku výkonu; tato průměrná hmotnost činí 0,11 kg [3].

1.1.4 Zákon č. 165/2012 Sb. Zákon o podporovaných zdrojích energie

Zákon č. 165/2012 Sb. vnáší do legislativy ustanovení týkající se likvidace fotovoltaických modulů. Určuje, že převedení povinnosti výrobce spojené s recyklací je možné převést pouze na právnickou osobu, která je založená nejméně čtyřmi výrobci elektrozařízení či nejméně čtyři sdružuje. Dále nařizuje, že provádění zpětného odběru elektrozařízení a odděleného sběru elektroodpadu ze solárního zařízení, jež jsou součástí výroben elektřiny do 30 kW, musí být provedeno sítěmi zpětného odběru a odděleného sběru o dostatečné četnosti a dostupnosti [4][5].

1.2 Recyklace v česku

K 27. červnu 2013 se v České republice nacházely čtyři firmy fungující jako kolektivní systémy. K 23. květnu 2021 registruje ministerstvo životního prostředí patnáct

provozovatelů kolektivních systémů se souhlasem pro zajištění financování pro nakládání s elektroodpady a s historickými elektrozařízeními. Z těchto patnácti firem jich dvanáct disponuje souhlasem k nakládání a financování se solárními moduly. Přehled těchto firem je v tabulce 3.1. Z narůstajícího počtu firem od roku 2013 je možné usoudit, že v České republice narůstá používání solárních modulů jako zdroje elektrické energie, což vede i ke zvýšení množství odpadu ze solárních modulů. To následně vede k zvýšené recyklaci solárních modulů.

Tabulka 1.1 Přehled kolektivních systémů v České republice

Kolektivní systém	Disponuje povolením k nakládání a financování solárního modulu
ASEKOL a.s.	Ano
ASEKOL Solar s.r.o.	Ano
Bren, s.r.o.	Ne
ČEZ Recyklace, s.r.o.	Ano
ECOPARTNER s.r.o.	Ano
EKOLAMP s.r.o.	Ne
ELEKTROWIN a.s.	Ano
FitCraft Recyklace s.r.o.	Ano
MINTES Solutions s.r.o.	Ano
PV Recovery, s.r.o.	Ano
Recycling Systems, s.r.o.	Ano
REMA PV Systém, a.s.	Ano
REMA Systém, a.s.	Ne
REsolar s.r.o.	Ano
RETELA, s.r.o.	Ano

[6][7] [8]

Konkrétnější představu o recyklování fotovoltaických modulů je možné vytvořit na základě informací, které byly poskytnuty k 10. prosinci 2020 zástupcem firmy ASEKOL Solar. Firma ASEKOL Solar je jedna z firem fungující jako kolektivní systém solárních modulů. Tato konkrétní firma předá k recyklaci okolo 500 solárních modulů ročně. Až na výjimky jsou tyto moduly odváženy k recyklaci z důvodů mechanického poškození, způsobené převážně přírodními živly. Klientelu této firmy tvoří z většiny jednotlivci než firmy. Pokud by se tyto informace potvrdili i u ostatních kolektivních systémů, mohlo by se vyvodit, že v České republice převládá osobní využití výroby elektrické energie než k velkokapacitní výrobě.

1.3 Recyklace v zahraničí

V členských zemích Evropské unie podléhá recyklace fotovoltaických modulů směrnici

Evropské rady a parlamentu o odpadních elektrických a elektrotechnických zařízeních, v originále „Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council on waste electrical and electronic equipment (WEEE)“ již zmíněné v podkapitole 3.1.1. Nejvýznamnějším členem Evropské unie v oblasti využití a recyklace fotovoltaických modulů je Německo, jenž se na světovém žebříčku řadí mezi prvních 10 států v oblasti využití solárních modulů. Fraunhofer Institute for solar energy systems ISE uvádí, že v první polovině roku 2020 pokryl podíl elektrické energie vyrobené solárními moduly z celkovému energetického odběru Německa 27,87 TWh, což je 11,4 % celkové spotřeby. Očekává se, že k roku 2050 bude moduly, které ukončily svůj funkční životní cyklus, vytvořen odpad blížící se 4,3 milionům tun [1][9][10].

Japonsko v současné době zaujímá čtvrté místo na žebříčku států s největším podílem využitím solární energie. Japonsko se od havárie jaderné elektrárny Fukušima roku 2011 snaží převést co nejvíce výroby elektrické energie do odvětví solárních modulů. To vedlo například k výrobě unikátních plovoucích solárních elektráren. Očekává se, že, k roku 2050 vyprodukuje Japonsko celkem 6,5 milionů tun odpadu vysloužilých solárních elektráren. Přestože v Japonsku k roku 2019 neexistovaly regulace ohledně recyklace fotovoltaických modulů, Japan Photovoltaic Energy Association (JPEA) vydala neoficiální pokyny pro recyklaci. U Indie, která se na žebříčku států s podílem využití solární energie nachází na třetím místě, se očekává vyprodukování 4,5 milionů tun odpadu. Indie stabilně pokračuje v aplikaci solárních modulů jak ve veřejném tak soukromém sektoru. Podobně jako v Japonsku, k roku 2019 v Indii neexistovaly oficiální regulace týkající se recyklace fotovoltaických modulů. Přestože Ministry of New and Renewable Energy (MNRE) nařizuje výrobcům po ukončení doby životnosti postarat se o vzniklý odpad v souladu s e-rules pravidel, tato pravidla k roku 2019 neobsahují pokyny jak zacházet se solárními moduly [9][10][11] [12].

Spojené státy americké jsou v současné době ve světovém žebříčku využívání solárních modulů na druhém místě. K prosinci 2020 ve Spojených státech neexistovala jednotná regulace, která by se zabývala recyklací solárních modulů a tato povinnost je převedena na jednotlivé státy. Většina jednotlivých států se ovšem k tomuto tématu nevyjadřuje, nebo solární moduly zahrnuje jako běžný komunální odpad. Očekává se, že do roku 2050 Spojené státy americké vyprodukují 7,5 milionů tun odpadu solárních modulů [9][10][13].

Čínská lidová republika se na žebříčku států s využitím solárních modulů umisťuje na prvním místě. Jakožto země s bezkonkurenčním náskokem v produkci skleníkových plynů naznačuje tento přístup snahu o přechod na čistší zdroj elektrické energie. Tento přechod s sebou ovšem nese problematiku množství odpadu. Ačkoliv v Číně od roku 2011 fungují regulace ohledně elektronického odpadu, Čína solární moduly jako elektronický odpad neregistruje [9][10][11].

2. RECYKLACE FOTOVOLTAICKÉHO MODULU

Fotovoltaický solární modul je řazen mezi obnovitelné zdroje elektrické energie. ČEZ označuje elektrickou energii vyrobenou solárními moduly jako Zelenou elektřinu. O té tvrdí, že pochází z výhradně obnovitelných zdrojů a že se jedná o ekologickou elektrickou energii. To ovšem není úplná pravda. Ačkoliv solární moduly představují obnovitelný zdroj elektrické energie, samotný fotovoltaický modul představuje po ukončení své funkční doby používání průmyslový odpad, který může obsahovat toxické materiály. Řešením tohoto problému je jejich recyklace [14][15].

2.1 Recyklované části solárního modulu

Jako příklad bude použit monokrystalický křemík vzhledem k jeho nejrozšířenějšímu použití.

Rám solárního modulu se vyrábí převážně z hliníku. Rám tvoří 22 % z celkové hmotnosti modulu a na jeho výrobu připadá 8 % celkové energie. Je také možné vyrábět moduly bez rámu. Recyklování hliníku není náročné, ovšem není to primární cílová skupina.

Nosný materiál, nejčastěji sklo, tvoří 63 % hmotnosti fotovoltaického modulu. Díky recyklaci se může používat opakovaně a tím osáhnout až 40 % energetické úspory na výrobě.

Nejdůležitější částí na fotovoltaickém modulu jsou solární články. Z těch se recyklují těžké a vzácné kovy a křemík. Ten představuje nejdůležitější recyklovaný materiál z celého modulu. K výrobě čistého křemíku je spotřebované největší množství energie a cenových nákladů. Problémem je i využití zbylých odřezků z křemíkového ingotu jelikož při odřezávání může dojít ke znečištění a tudíž znehodnocení materiálů.

Těžké kovy představují z hlediska energetické náročnosti a ceny zlomkové množství. Avšak problém s těžkými kovy jako olovo spočívá v jejich toxicitě a nešetrnosti k životnímu prostředí. Problém do budoucna může představovat i použití stříbra. Stříbru hrozí jakožto vzácnému a cennému kovu nárůst hodnoty a s tím i nákladů na těžbu [16].

2.2 Metody recyklace

2.2.1 Termická recyklace

Termická recyklace se dělí do dvou fází, a to oddělení fotovoltaického článku a čištění jeho povrchu.

Oddělení článků od modulu probíhá ve vysokoteplotní peci při teplotě 500 °C. Během této teploty dochází k vypaření plastových materiálů, například laminační vrstvy, které jsou následně řízeně spalovány. Po vychladnutí se manuálně odebere sklo

a kovy. Ty jsou zaslány k recyklaci. Tímto se získá více než 90 % použitého skla a 95 % polovodičového materiálu z každého modulu pro použití v novém modulu. Po tomto zbudou solární články, které jsou dále přepraveny k chemickému leptání. Tímto procesem je možno získat k recyklaci až 98 % solárních článků z modulu. Články, na kterých se vyskytuje mechanické poškození ve formě mikrotrhlin nebo odštěpků, nemohou podstoupit leptací proces a jsou odeslány k odebrání křemíku a vyhození. U širších článků dochází zpravidla k méně častému poškození než u tenčích.

Po tepelném odebrání následuje chemické čištění. To se provádí za účelem odstranění kovových elektrod, antireflexní vrstvy a P-N konektorové vrstvy. Výsledná deska může být využita pro výrobu nového fotovoltaického článku nebo využita k získání čistého křemíku. Volba leptání se odvíjí od individuálního složení leptaného článku, druhů nečistot a typu příměsí v křemíku. Vzhledem k pestrosti složení nemůže být provedeno univerzální leptání a musí se provést v několika selektivních leptacích krocích.

Jako první je odstraněna kovová vrstva, jmenovitě stříbro, ze zadní části článku. K tomu se používá hydroxid sodný nebo hydroxid draselný. Roztavené stříbro se poté získá z odpadní kyseliny elektrolýzou. Dále se leptají teflonové obaly při teplotě 80 °C ve vodní lázni s 30 % koncentrací hydroxidu draselného (KOH). Po odleptání teflonu následuje leptání P-N přechodové vrstvy a antireflexní ochrany. K tomu se používá směs kyseliny fluorovodíkové (HF), kyseliny octové (CH₃COOH) a kyseliny dusičné (HNO₃) v poměru 1:2:5.

Během procesu jsou použity směsi, které obsahují toxické fluoridy a druhy oxidů dusíku. Použití těchto chemikálií vytváří vysoké náklady na jejich likvidaci. Navíc během leptání dochází k autokatalytním reakcím, které činní leptací proces méně ovladatelný. Tím vznikají křemíkové ztráty [17][18].

2.2.2 Mechanicko-chemická recyklace

Mechanická část recyklace se skládá ze dvou částí: drcení a separace. Po ní dochází k chemickému ošetření.

Před začátkem drcení je modul očištěn od všech možných nečistot. Po očištění jsou odebrány snímatelné části jako hliníkový rám, nosná kostra či vodivý kabelový systém, který se dá ručně odpojit. Poté následuje drcení a mletí. Cílem je zpracování článků na dostatečně malá zrna vhodná k dalším úpravám. Nadrcením se odstraní i laminátová vazba což umožňuje následnou chemickou úpravu. Síťové třídiče nadrcený kusy vytřídí dle velikosti. Následně dochází k separaci. K té dochází použitím mokrých splavů nebo elektrodynamické separace. V případě použití mokrého splavu jsou roztřízeny jsou roztřízeny podle objemové hmotnosti a v případě elektrodynamické separace podle elektrické vodivosti). Tím vznikne skelná a kovová fáze. Skelná fáze se odstraní a předá k novému zpracování. Kovová fáze postupuje k dalšímu třídění.

V poslední části dochází k chemickému zpracování. Jeho cílem je získání zbývajících cenných kovů. Využívají se zejména metody loužení (rozpuštění), elektrolýzy a polymetalurgická separace [17][19].

2.2.3 Laserová recyklační metoda

Krom komerčně používaných metod recyklace existuje i laserová metoda. Pro laserovou metodu se využívá pulsní laser o vlnové délce 1064 nm. Použitím laseru je možné odstranit antireflexní vrstvu a hliníkovou vrstvu ze zadní strany článku. Nevýhodou této metody je doba potřebná k očištění. Oproti chemickému čištění je laserová metoda schopna vyčistit pouze zlomkové množství plochy jako metoda chemická. Další nevýhodou je vysoká pořizovací cena laserů. Kvůli těmto důvodům je laserová metoda neefektivní a její používání není rozšířeno [20].

2.3 Proč se solární moduly sváží k recyklaci

Důvodem recyklace solárních modulů je zákon 185/2001 o odpadech. Ten nařizuje, že každý solární modul musí být po ukončení jeho používání recyklován. O tomto zákoně bude více sděleno v následující kapitole.

Solární moduly jsou odváženy k recyklaci ve dvou případech. První případ je z důvodu mechanického poškození, které činí solární modul nefunkčním. Druhým případem je snížení účinnosti či neschopnost vytvářet elektrický proud z důvodu opotřebování po konci doby životnosti. Různé zdroje se shodují, že poruchovost způsobená nedokonalostí výroby je tvořena zlomkovým množstvím celkem odevzdaných modulů k recyklaci. Hlavním zdrojem odepsaných modulů je externí mechanické poškození, nejčastěji přírodními živly. Toto bylo potvrzeno i zástupcem firmy ASEKOL Solar s.r.o., jedné z českých firem fungující jako kolektivní systém pro majitele fotovoltaických modulů [17].



Obrázek 2.1 Poškozený solární modul

3. FOTOVOLTAICKÝ MODUL

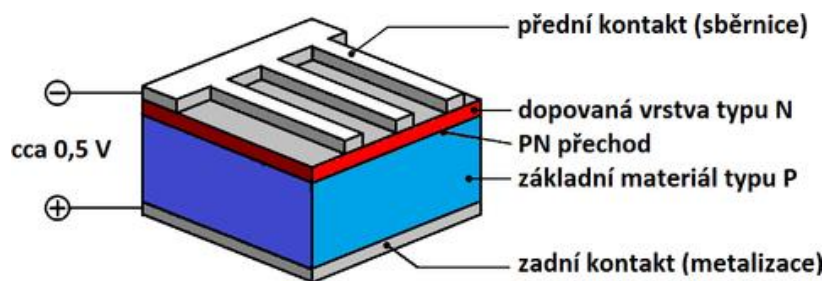
Fotovoltaické moduly slouží jako alternativní a obnovitelné zdroje elektrické energie. Tato kapitola se zaměřuje na princip jeho fungování, jeho historickém vývoji, typy fotovoltaických modulů a na to, jak se fotovoltaické moduly vyrábí.

3.1 Princip fotovoltaického modulu

Fotovoltaický modul se skládá z fotovoltaických článků. Tyto články můžeme charakterizovat jako polovodičovou diodu. Tyto diody jsou vyráběny ze specifických materiálů. Nejčastějším materiálem pro jejich výrobu je křemík. Krom křemíku se vyrábí také z arsenidu galia (GaAs), diselenu mědi india (CuInSe₂), selenu mědi india galia (CuInGaSe), teluridu kademnatého (CdTe) a sulfidu kademnatého (CdS). Z těchto materiálů jsou vyrobeny dvě na sebe položeny vrstvy. Jedna vrstva se vyznačuje vodivostí typu P a druhá vodivostí typu N. Na jejich rozhraní dojde k vzniku P-N přechodu. Na vrstvu N dopadá sluneční světlo. Polovodič typu N energii světla ve formě dopadajících fotonů absorbuje a dochází k vytvoření páru elektron-díra [21].

Vlastnost těchto párů je z velké části závislá na šířce zakázaného pásu polovodiče, W_z . Fotony s energií větší než W_z určují maximální proudovou hustotu a fotony s nižší energií než W_z mají lepší schopnost transformace energie k vytvoření páru elektron-díra. Optimální šířka zakázaného pásma je 1,1 eV. Při této hodnotě je maximální množství sluneční energie využito ke generaci párů elektron-díra a přibližně 50 % solární energie je přeměněno na energii elektrickou. Kromě vytvoření páru elektron-díra dochází také k vzniku přebytečné energie ve formě Joulova tepla. V případě speciálních termofotovoltaických modulů je využito i toto nežádané teplo.

Po vytvoření páru elektron-díra následuje jejich oddělení. Toho dosáhneme použitím vnitřního elektrického pole P-N přechodu. Elektron je působením tohoto pole přitažen k jedné elektrodě a díra k druhé. Tomuto jevu se říká nábojová separace. Energie takto uvolněného elektronu se následně využije jako zdroj elektrické energie [21].



Obrázek 3.1 Schéma struktury fotovoltaického článku z krystalického křemíku

3.2 Třetí generace fotovoltaických článků

Fotovoltaické články třetí generace se v současné době nachází ve stádiu vývoje. V současné době jsou vyvíjeny mnohé technologie, které jsou zaměřené na využití odlišných metod. Jejich cílem je, aby účinnost vyvíjené technologie překonala Shockleyho-Queisserovu hranici. Tato hranice spočívá v předpokladu, že jeden dopadající foton je schopen vytvořit pouze jeden využitelný exciton. Energie tohoto excitonu je rovna energii zakázaného pásu a veškerá přebytečná energie se přemění na teplo. Příklady takových technologií jsou:

- Tandemové tenkovrstvé články.
- Články s vícenásobnými pásy.
- Články, které by využívaly „horké“ nosiče náboje pro generaci více párů elektronů a děr – termofotovoltaická přeměna, kde absorbér je současně i radiátorem vyzařujícím selektivně na jedné energii.
- Termofotonická přeměna, kde absorbér je nahrazen elektroluminiscencí.
- Prostorově strukturované články vznikající samo organizací při růstu aktivní vrstvy.
- Organické články.

V současné době je tandemový článek jediný funkční zástupce třetí generace fotovoltaických článků. Dále se také mluví o aplikacích organických článků. Jejich výhoda ale spočívá v nízké ceně výroby, nikoliv vyšší účinnosti [21] [22].

3.3 Typy fotovoltaických článků

3.3.1 Monokrystalické solární články využívající křemík

Křemíkové monokrystalické články jsou nejstarší a nejvíce používanou technologií v oblasti fotovoltaických článků. Tyto typy článků jsou celkově vyráběny z jednoho monokrystalu pomocí pěstování z taveniny. Ačkoliv je možný i růst z plynné fáze, tato metoda je časově a nákladově náročná. Výsledné krystaly často najdou aplikace pouze ve formě tenkých monokrystalických vrstev.

Křemíkové monokrystalické články mají oproti jiným typům článků větší účinnost sahající až k 25 %. Dále nabízí životnost přesahující dobu 25 let. S těmito výhodami se ovšem pojí i vyšší pořizovací cena.

Díky své vysoké účinnosti jsou monokrystalické články vhodné pro použití v oblastech, kde je možná instalace na malých, omezených prostorech. Krom osobního použití se tyto typy solárních modulů používají hojně i v solárních elektrárnách. Při instalaci těchto modulů je nutné brát v potaz chlazení [21] [23].



Obrázek 3.2 Křemíkový monokrystalický článek

3.3.2 Polykrystalické solární články využívající křemík

Polykrystalické články, nazývány také multikrystalické, vznikají spojením více krystalů. Kusy těchto jednotlivých krystalů jsou roztaveny, slity dohromady a následně se vylijí do jedné tenké plátové vrstvy. Vzhledem k způsobu výroby těchto článků, jejich elektrony mají menší volnost pohybu což se projevuje na výkonu článku. Další nedokonalostí jsou ztráty mezi jednotlivými krystaly. Vzhledem k nedokonalé návaznosti dochází k nesladěnosti a účinkovým ztrátám. Této nesladěnosti se ovšem dá využít v případech, kdy světelné paprsky nedopadají na solární modul přímo ale pod více úhly. V takovém případě je tato nesladěnost výhodou.

Vzhledem k nižší náročnosti výroby a nižším nákladům se polykrystalické články nabízí jako levnější alternativa oproti monokrystalickým článkům, avšak na úkor nižší účinnosti. Od toho se odvíjí oblast využití a to zejména v domácnostech a obydlích [23].



Obrázek 3.3 Polykrystalický solární modul

3.3.3 Amorfni solární články využívající křemík

Amorfni křemíkové články se vyznačují svými malými rozměry. Tento typ článků se aplikuje ve formě tenkých plátek. Dále je pro ně typický nízký stupeň účinnosti, který se v praxi pohybuje do 9 % a v laboratorních podmínkách nepřekročí 12,5 %. Využitím těchto solárních článků v zapojeních naprázdno vede k dostatečnému výkonu k pohonu malého zařízení. V případě solárních článků význam slova amorfni označuje flexibilní a ohybatelné vlastnosti článku. Amorfni moduly je možné slučovat na rozdíl od ostatních modulů již během výrobního procesu. Díky vysoké automatizaci a možnosti nanesení vrstvy na levné materiály jako sklo či plast je celková cena nákladů na výrobu velmi nízká. Amorfni články mají také schopnost kterou žádný jiný článek nedisponuje. Mohou být naskládány přímo na sebe, což může vést k zvýšení celkového výkonu.

Amorfni křemíkové články se používají zejména v malých elektrospotřebičích, jako ruční hodinky či kapesní kalkulačky. Pro tato elektrická zařízení není typický velký odběr elektrické energie, tudíž malý výkon amorfniho článku na pokrytí stačí. K tomu je vázána i nízká cena článku [21][24][25].



Obrázek 3.4 Kalkulačka Casio s amorfni krystalovým článkem

3.3.4 Solární články využívající telurid kadmia

Solární články které využívají polykrystalický telurid kadmia jsou aplikovány formou nanášení tenkých vrstev. Díky tomu se také řadí mezi amorfní solární články. Krom amorfních vlastností disponují také ideální šířkou zakázaného pásu blížící se 1,5 eV. Díky tomu je tento článek schopen vysoké absorpce slunečního záření. Účinnost těchto článků se pohybuje v rozmezí 9–11 %. Vlastnosti binárních slitin činí tento typ článků jednoduchým na výrobu.

Podobně jako u amorfního křemíku, i tyto solární články se vyrábí a aplikují v malých rozměrech ve formě napájení kapesních elektrospotřebičů. Oproti amorfnímu křemíku vyvstává problematika kadmia. Kadmium jakožto těžký kov představuje vážná rizika. Prvním problémem jsou jeho projevy na lidské zdraví. Kadmium se ukládá v živočišné tkáni (zejména v ledvinách a játrech) a lidské tělo potřebuje dlouhou dobu na jeho vyloučení z těla. Projevy otravou kadmiiem je selhání ledvin, poškození lidského plodu a rozklad červených krvinek. Únik kadmia může také znamenat ekologickou katastrofu. A v neposlední řadě, kadmium ukládá velké nároky na recyklaci článků [21][25][26].

3.3.5 Solární články využívající arsenid galia

Arsenid galia je polovodičová sloučenina arsenu a galia. Tento typ polovodiče je jeden z nejvýkonnějších, které se mohou v solárních článcích používat. To je zapříčiněno jejich hodnotou zakázaného pásma, která se blíží 1,5 eV. Díky tomu je schopen dosáhnout účinnosti až 34 %. Avšak s tímto druhem článků souvisí problémy v oblasti výroby a nákladů. Galium se v přírodě nachází ve formě příměsí v rudách kovů olova, zinku a hliníku. Z nich se získává jako vedlejší produkt tavením. Tím se galium stává náročným a drahým materiálem. Arsen představuje oproti galiu běžnější a dostupnější materiál. Způsobuje ovšem zdravotní potíže. To dělá z článků využívajících arsenid galia velmi účinný, avšak drahý a potencionálně zdraví nebezpečný zdroj elektrické energie. Vzhledem k cenové náročnosti se arsenid galia nepoužívá k plošné velkokapacitní výrobě elektřiny, ale spíše ve specifickém oddělení techniky. Příkladem takového oddělení je vesmírný program NASA.

NASA využívá pro solární napájení svých strojů vysílaných do kosmu dva typy článků. Zpočátku používala NASA články z polykrystalického křemíku. Ty byly později nahrazeny články z arsenidu galia. K tomuto vedlo více faktorů. Díky vysoké absorpci světelné energie může být tloušťka článků z arsenidu galia článku zlomková oproti křemíku. Dále články z arsenidu galia pracují lépe za vyšších teplot. Největší výhodou je vysoká odolnost vůči poškození způsobené ozářením.

Nejvýznamnějším příkladem použití arsenidu galia ve vesmíru je rover Opportunity. Roku 2003 byla ze Země vyslána dvojice roverů, Opportunity a Spirit, jejichž cílem bylo přistát na povrchu Marsu a po dobu 90 dní na Marsu provádět výzkum. Solární moduly nainstalované na tyto rovery disponovaly výkonem 140 W a k pohonu roveru byla potřeba 100 W. Laboratorní testy a simulace naznačovaly, že prachové bouře na Marsu pokryjí po 90 dnech povrch modulů natolik, že rovery nebudou schopny funkce. Simulace dále naznačovaly degradaci účinnosti o 30 % celkové účinnosti během jednoho roku na Marsu. Navzdory nepříznivým podmínkám vydržely rovery pracovat mnohem déle. Po úspěšném přistání na povrchu v lednu 2004 oba rovery zdaleka přežily svou odhadovanou dobu životnosti. Poslední úspěšná komunikace s roverem Spirit proběhla 22. března 2010. Poslední komunikace s Opportunity proběhla 10. června 2018 během prachové bouře. Předpokládaným důvodem přerušení komunikace je kompletní zanesení prachem či mechanické poškození způsobeno bouří [21][27][28].



Obrázek 3.5 3D model roveru Opportunity

3.3.6 Solární články využívající CIS/CIGS

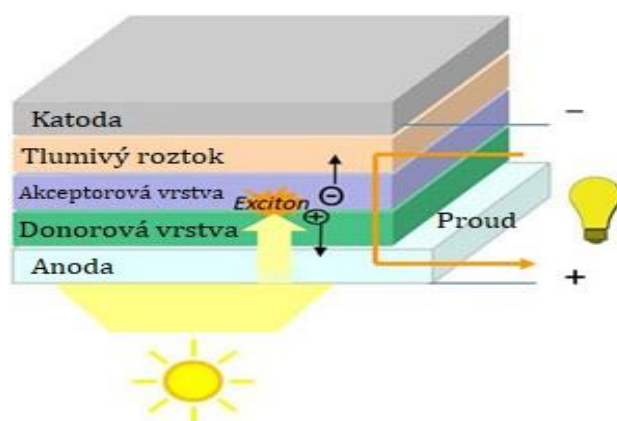
CIS je označení pro diselenid mědi india (CuInSe_2). V přírodě se tyto prvky dohromady vyskytují v minerálu chalkopyrit. Tento polovodič se nanáší v tenkých vrstvách na sklo či kovovou nebo polyamidovou fólii, a tím je řazen mezi amorfní články. Jelikož se jedná o polovodič typu P, je nanášen v kombinaci s jiným polovodičem typu N, nejčastěji s kadmíem síry (CdS). Takovéto konstrukci se říká heteropřechodová. Pro tento typ článku je charakteristická vysoká absorpce dopadajícího slunečního záření. Dále je pro něj typická lepší účinnost při vyšších teplotách.

Tento typ polovodiče může být dále upraven přidáním gallia. Po úpravě může vzniknout sulfid mědi india galia (CIGS) nebo selenid mědi india galia (CIGSe). Díky přidanému galiu je pro tyto články možné dosáhnout účinnosti až 23,2 %, což je dostává na podobnou účinnost jako u výkonnějších křemíkových článků. Oproti křemíkovým článkům je ale proces výroby CIGSe článků z jedné třetiny náročný. Další výhodou je lepší schopnost pracovat v lokalitách s větší teplotou. Zatímco křemíkové články v teplotách nad 25 °C ztrácí svou účinnost, a tím i svůj výkon, účinnost CIGSe článků zůstává neměnná. Tím je schopen déle a stabilně dodávat zdroj elektrické energie [21][29][30].

3.3.7 Organické solární články

Organické solární články používají pro přeměnu energie namísto anorganických látek látky organické. Tyto organické látky se dělí na dvě skupiny: polymery a malé organické molekuly. Jako donory slouží malé molekuly organických látek (například 2-[(7-{4-[N,N-Bis(4-methylphenyl)amino]phenyl}-2,1,3-benzothiadiazol-4-yl)methylen]propandinitril 97% (HPLC)) a polymery (například MDMO-PPV). V akceptorové vrstvě se používají fulereny (například 4-(1',5'-Dihydro-1'-methyl-2'H-[5,6]fullereno-C60-1h-[1,9-c]pyrrol-2'-yl) benzoová kyselina). Proces přeměny probíhá na stejném principu jako u článků využívající anorganické materiály. Při osvětlení organického materiálu dochází k vzniku excitonu vyražením z valenční vrstvy do vodivostní vrstvy. Tento exciton se následně přesune díky koncentračnímu gradientu do meziprostoru donoru a akceptoru a dochází k rozdělení na díru a elektron. Ty následně cestují k příslušné elektrodě a uvolněný elektron se použije k tvorbě elektrické energie.

Hlavní výhodou organických solárních článků je jejich materiálová nenáročnost. Organické materiály vhodné k výrobě těchto článků jsou široce dostupné a velmi levné. Další výhodou je nenáročnost zpracování. Díky organickým vlastnostem materiálů je možné použití způsobu převíjení substrátu, anglicky „Roll-to-roll processing“. Při tomto procesu se používá rychlého automatického nanášení materiálu na fólii. Největší nevýhodou je jejich nižší účinnost, která se běžně nachází okolo 11 %. V roce 2018 se v laboratorních podmínkách povedlo dosáhnout účinnosti 17,4 % [31][32][33][34].



Obrázek 3.6 Stavba dvouvrstvého organického solárního článku

3.4 Výroba fotovoltaického článku

Fotovoltaický modul se skládá z aktivní a pasivní vrstvy. Aktivní vrstva se skládá z fotovoltaických článků naskládaných vedle sebe a elektrického obvodu, který vytvořenou elektřinu odvádí. Pasivní vrstva se skládá z kostry, ve kterých fotovoltaické články drží, a ochranné vrstvy, která zabraňuje fyzickému poškození fotovoltaických článků. Moduly mohou být samostatně, nebo být napojeny do systému více modulů. Modul může dále disponovat chladicím systémem, který se stará o regulaci teploty. Dále bývá modul krom odběru napojen na monitorovací systém, který monitoruje hodnoty vytvořené energie. Dále se může u modulu nacházet čistící zařízení, které odstraňuje narušující nečistoty z povrchu modulu.

3.4.1 Výroba monokrystalických článků

Nejdůležitějším materiálem pro výrobu křemíkových solárních modulů je samozřejmě křemík. Pro monokrystalické články se využívá výhradně velkých jednolitých kusů křemíku. Nejběžnější a nejhospodárnější způsob jak křemík získat je pěstováním z taveniny. Jiné způsoby jako růst z plynné fáze jsou nepoužitelné kvůli nedostačující velikosti vzniklého křemíku.

K výrobě monokrystalických křemíkových článků se používají dvě hlavní metody: Czochralského metoda (přezdívaná také jako tažení z kelímku“) a metoda zónového tavení. Podrobněji se zaměříme na Czochralského metodu.

Jako první je potřeba zpracovat surový křemík do zpracovatelné podoby. Do speciálního kelímku z nejčistšího křemenného skla se vloží čisté kusy polykrystalického křemíku. Ten se následně umístí v grafitovém kelímku do tavné elektronické pece, která při teplotě 1420 °C křemík roztaví. Tavenina se uvede do kontaktu s očkovacím křemíkovým krystalem. Očkovací krystal začne odvádět teplo, tím se způsobí jeho růst. Přibližná rychlost růstu očkovacího krystalu se pohybuje v řádech centimetrů za hodinu. Regulační mechanismus se stará o regulaci teploty

a rychlost tažení krystalu. Výsledný válcový monokrystal může dosahovat rozměrů až 200 mm v průměru a 70 kg hmotnosti. Vzniklý ingot je rozřezán na destičky o přibližné tloušťce 0,3 mm. Zbylé nevyužitelné kousky ingotu jsou určeny k opětovnému tavení. Leptáním se opracuje povrch od poškození struktury způsobeného řezáním. Tím se na povrchu vytvoří miniaturní křemíkové pyramidy, které snižují odraz světla. Dále je difundován fosfor a dochází ke vzniku 500 nm tenké vrstvy polovodiče typu N. Tím vzniká pod povrchem PN přechod. Destička je ořezána z kruhovitěho tvaru ingotu do typického čtvercovitého tvaru s ořezanými rohy. Sítotiskovou metodou se na spodní straně nanese hustá sběrnice kontaktů ze stříbra a hliníku. Ty jsou za vysoké teploty zataveny až do křemíkového materiálu. Následuje ještě jeden tisk kontaktních ploch k upevnění spojek mezi jednotlivými solárními články. Vzniklé články jsou následně testovány na limity výkonů a účinností. Nakonec se nanese ochranná nevodivá antireflexní vrstva z nitridu křemíku o přibližné tloušťce 80 nm a dochází k poslednímu celkovému spékání. Pakliže stanovené limity splňují, jsou sériovým a paralelním spojením zapojeny a nainstalovány do fotovoltaického modulu [21][35].

3.4.2 Výroba polykrystalického článku

Pro výrobu polykrystalických článků se využívá čistý křemík, který se vyrábí z metalurgického surového křemíku. Ten se získává tavením křemence a uhlí při teplotě 1800 °C. Dalším vhodným postupem je destilace vhodných sloučenin křemíku. Nejčastější typ chemické destilace je chlorsilanový proces.

Proces výroby polykrystalického článku probíhá podobně jako u monokrystalického článku, je ale podstatně zjednodušený. Křemík je po roztavení nalit do formy, kde se nechá pozvolna chladnout. Po ztuhnutí následuje řezání, leptání, difundace, ošetření ochrannou nevodivou vrstvou, sítotisk testování a instalace [21][36].

3.4.3 Výroba tenkovrstvých (amorfních) článků

Tenkovrstvé (amorfní) solární články se nejčastěji vytváří metodou převíjení substrátu, anglicky „Roll-to-roll processing“. Tenká vrstva polovodičového materiálu je nanesena sítotiskem na sklo, plast či nerezové oceli. U jednotlivých typů tenkovrstvých článků se postup výroby částečně liší.

Amorfní křemíkové články se vyrábí v šesti krocích. Nejprve se na skleněný substrát nanese vrstva průsvitného vodivého oxidu TCO, například cínového oxidu indium (ITO). Substrát se následně laserově opracuje. Poté se nanese vrstva amorfniho křemíku, následovaná dalším laserovým opracováním. Následuje nanesení kovové vodivé vrstvy a proces je zakončen finálním laserovým opracováním.

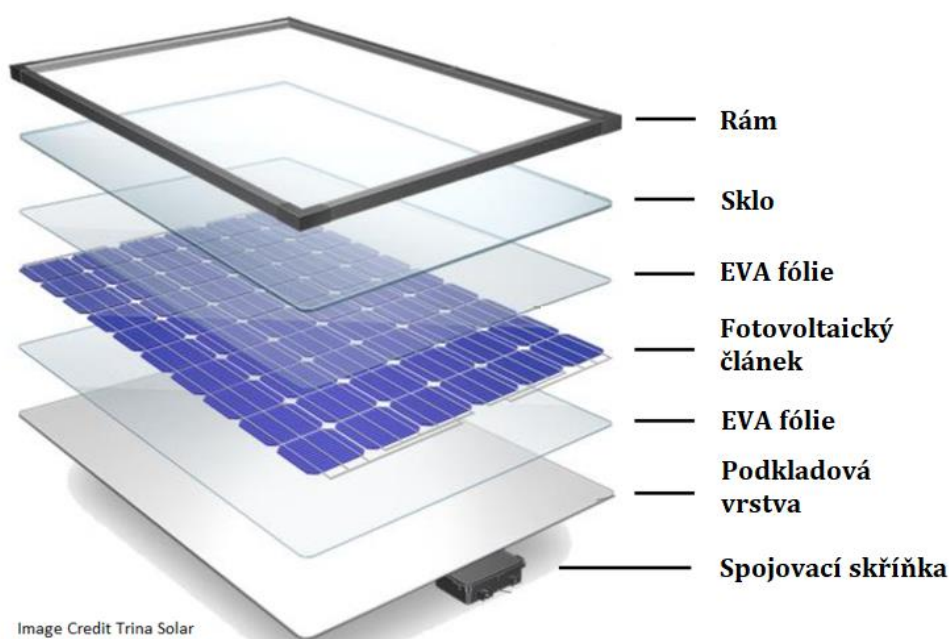
CIS solární články a jeho verze upravené o příměsi (například CIGS) se vyrábí stejným procesem jako amorfní křemíkové články. Odlišují se dvěma rozdíly. První rozdíl je, že se sklený substrát nachází na zadní straně článku. Druhým rozdílem je přidání vrstvy sulfidu kadmnatého (CdS), která slouží jako vyrovnávací vrstva.

Solární články z teluridu kadmia se vyrábí v kombinaci se sulfidem kademnatým (CdS). Tu využívá podobně jako CIGS solární články jako vyrovnávací vrstvu.

Vrstvy organických solárních článků jsou vyráběny s ohledem na jejich druh. Donorová vrstva složená z malých molekul organických látek se vyrábí vrstvicí, vakuovou metodou. Polymerní akceptorová vrstva se vytváří nanášením roztoku [21][31][37].

3.5 Struktura fotovoltaických modulů

Většina fotovoltaických modulů je konstruována podle stejné sestavy. Moduly mohou mít unikátní sestavu z důvodu jedinečné formy využití či kvůli druhu používaného solárního článku. Běžná sestava vypadá následovně.



Obrázek 3.7 Stavba monokrystalického solárního modulu

Čelní sklo chrání fotovoltaický článek před mechanickým poškozením způsobené počasím či jinými externími vlivy. Krom odolnosti vůči mechanickým činitelům musí být schopné ustát prudké změny teploty. Je možné dosáhnout vyšší účinnosti použitím skel s velmi nízkým podílem železa a antireflexním nátěrem.

Ethylen vinyl acetátové fólii slouží jako izolant a pojivo. Této vrstvě se věnuji podrobněji v následující samostatné kapitole.

Solární článek převádí energii fotonů na elektrickou energii. Tématu solárních článků se věnuji detailněji dříve v této kapitole.

Rám solárního modulu slouží jako nosná a ochranná konstrukce. Do tohoto rámu jsou naskládány a upevněny všechny ostatní části solárního modulu. Samotný rám bývá lehký ale zároveň odolný vůči poryvům větru a vnějšímu působení vlivů. Ostatní vrstvy

modulu se do rámu zachycují buď pomocí šroubů, upnutí či natlačením. Nejčastějším materiálem pro výrobu rámu je hliník.

Podkladová vrstva modulu slouží jako ochrana proti navlhání a mechanickým vlivům. Dále slouží jako elektrická izolace. Vyrábí se z různých druhů polymerů, nejčastěji z tedlaru. Existují i varianty která namísto podkladové vrstvy využívají druhou vrstvu skla.

Spojovací skříňka je voděodolná krabička umístěná na zadní straně modulu, do které jsou sváděny vývody všech solárních článků na modulu [38].

3.5.1 Solární moduly použité pro experimenty

Pro experimenty této diplomové práce byly použity dva typy solárních článků. Prvotní pokusy byly provedeny na vzorcích nařezaného monokrystalického solárního modulu dodaných fakultou a všechny zbylé experimenty byly provedeny na vzorcích tenkovrstvého solárního modulu, který byly dodány Ing. Petrem Maulem.



Obrázek 3.8 Vzorek monokrystalického solárního modulu použitý pro experimenty

Vzorky nařezaného monokrystalického solárního modulu měly rozměry okolo 100 mm x 122 mm a vážily přibližně 222 g. Pohledem lze jasně pozorovat ochranné sklo, solární článek s elektrodami a z boku jde určit i ethylen vinyl acetátová fólie. Zespod lze pozorovat podkladovou vrstvu, která je také ze skla.



Obrázek 3.9 Vzorek tenkovrstvého solárního modulu použitý pro experimenty

Vzorky tenkovrstvého solárního modulu byly nařezány z jednoho celého solárního modulu natlakovaným vodním paprskem. Vzorky tenkovrstvého solárního modulu měly rozměry okolo 160 mm x 82 mm a vážily přibližně 122 g. Pohledem lze jasně pozorovat ochranné sklo, solární článek s elektrodami a z boku jde určit i ethylen vinyl acetátová fólie. Zespod jde vidět podkladová vrstva, zde tvořena s největší pravděpodobností tedlarem.

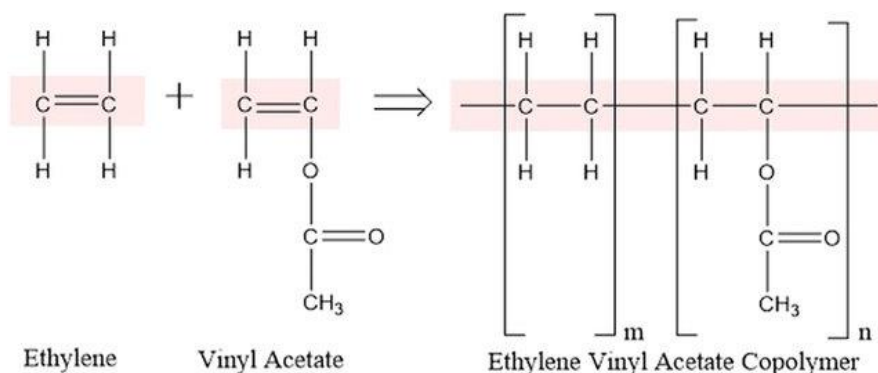
4. EVA (ETHYLEN VINYL ACETÁT)

Cílem praktických experimentů je docílit oddělení skla od zbytku solárního modulu. Sklo je ke zbytku solárního modulu připojeno izolační a pojivou vrstvou ethylen vinyl acetátu. Pro oddělení skla je nutno tuto vrstvu odstranit a proto je nutno se jí v práci zabývat.

Ethylen vinyl acetát (EVA) je kopolymer ethylenů a vinyl acetátu. Řadí se také mezi elastomery a svými vlastnostmi připomíná termoplasty.

4.1.1 Složení

Základními složkami kopolymeru ethylen vinyl acetátu jsou ethylen a vinyl acetát. K jejich spojení dochází polymerizací vinyl acetátu s ethylenem, při které se naruší krystalická struktura přítomná v polyethylen. Nakonec vznikne výsledný amorfní materiál – ethylen vinyl acetát. Pakliže je podíl vinyl acetátu do 4 %, bavíme se o vinyl acetátem upravený polyethylen. Pakliže je podíl vinyl acetátu mezi 4 % a 30 %, jedná se o nejběžnější termoplastický kopolymer ethylen vinyl acetát. Pakliže podíl vinyl acetátové složky přesahuje 40 %, jedná se o ethylen vinyl acetátovou gumu [39][40].



Obrázek 4.1 Chemický vzorec ethylen vinyl acetátu

4.1.2 Vlastnosti

Ethylen vinyl acetát se dá popsat jako gumě podobný materiál s podobnou hladkostí a ohebností. Vyznačuje se dobrou průhledností a leskem, nízkou teplotní tuhostí, odolností vůči praskání v namáhání, odolností vůči vysokým teplotám, voděodolností a odolností vůči UV záření.

Některé vlastnosti ethylen vinyl acetátu se odvíjí od podílu obsahu vinyl acetátu ve výsledném kopolymeru. S rostoucím procentuálním obsahem vinyl acetátu přímo úměrně roste průhlednost a ohebnost [39][40].

4.1.3 Využití ethylen vinyl acetátu

Ethylen vinyl acetát je používán například ve zdravotnictví pro postupné dávkování

lčiv do krevního oběhu pacienta. Využívá se také jako náhrada místo gumových či vinylových součástí elektrických spotřebičů. Je také jednou z ingrediencí pro výrobu potravinové fólie, některých lepidel či vysoko tavných lepidel.

Další možností aplikace ethylen vinyl acetátu je v podobě ethylen vinyl acetátové pěny. Ta se vyznačuje odolností vůči vibracím a nárazu, vodě a chemickému namáčení, tepelnou a zvukovou izolací a nízkou absorpcí vody. Můžeme ji nalézt například v automobilech, zdravotnictví, stavebnictví, sportovních pomůckách či elektronice [41].

4.1.4 Využití ethylen vinyl acetátu v solárních člancích

V solárních člancích se ethylen vinyl acetát používá jako ochranná vrstva oproti vlhkosti, částicím nečistot, vibracím a otřesům. Nejdůležitější vlastností, která umožňuje použití ethylen vinyl acetátu v solárních člancích, je téměř neomezená průhlednost.

Ethylen vinyl acetát se do modulu nanáší v podobě fólie. Solární článek je do této fólie oboustranně zabalen a následně pomocí laminačního stroje ve vakuu při teplotách dosahujících 150 °C zataven. Za správných podmínek dojde k výborným pojivým vlastnostem, které se projeví přilnutím ke sklu a spodní straně [39][40][42].

5. PRAKTICKÁ ČÁST

Jak již bylo zmíněno v teoretické části, pro jednodušší ekologičtější recyklaci je nutno pokusit se šetrně odstranit ethylen vinyl acetátovou vrstvu. Díky tomu by bylo možné sklo a solární článek opětovně použít, bez nutnosti rozbití celého modulu. Proto byl zvolen cíl této diplomové práce otestovat na kusech jednoho modulu různé vlivy, které by mohly vést k odstranění ethylen vinyl acetátové vrstvy.

5.1 Experiment 1 – vliv vysoké teploty

Pro tuto sadu experimentů byla použita vakuová sušička Goldbrunn 450, vzorky monokrystalického solárního modulu, vzorek tenkovrstvého solárního modulu, kovový stojan, kovová závaží (862 g a 868 g) a Petriho miska.

Cílem těchto měření bylo ověřit teoretický předpoklad, že působením vysoké teploty dojde k roztavení ethylen vinyl acetátu.

Testovaný článek byl stabilně umístěn na kovový stojan. Ten byl následně postaven do dostatečně velké Petriho misky tak, aby nedošlo k případnému znečištění vnitřku vakuové sušičky. Celá sestava byla následně vložena do vakuové sušičky. Následovalo postupné zvyšování teploty s časovou prodlevou pro dostatečné prohřátí modulu. Po vytažení byl proveden mechanický test vrypem skalpelu na ethylen vinyl acetátové vrstvě spolu pokusem o ruční odebrání skla. Na každé měření byl použit nový vzorek.

5.1.1 Provedená měření

Měření 1: Vzorek monokrystalického solárního článku byl postupně zahříván z pokojové teploty 25 °C až po maximální možnou teplotu sušičky 250 °C. Na vzorek solárního modulu byla zavěšena dvě kovová závaží o hmotnosti 862 g a 868 g. Účelem těchto závaží bylo oddělit svou vahou skleněnou vrstvu v moment, kdy se ethylen vinyl acetátová vrstva dostatečně roztaví. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 10 °C a po každém zvýšení teploty byl ponechán prostor 10 minut pro prohřátí a pozorování. Na ethylen vinyl acetátové vrstvě nebyla pozorována žádná změna, což bylo potvrzeno i mechanickým testem odolnosti vrypu skalpelem.

Měření 2: V sušičce bylo nasimulováno vakuum vytvoření a udržováním podtlaku 98000 Pa. Vzorek monokrystalického solárního článku byl postupně zahříván z pokojové teploty 25 °C až po maximální možnou teplotu sušičky 250 °C. Na vzorek solárního modulu byla zavěšena dvě kovová závaží o hmotnosti 862 g a 868 g. Účelem těchto závaží bylo oddělit svou vahou skleněnou vrstvu v moment kdy se ethylen vinyl acetátová vrstva dostatečně roztaví. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 10 °C a po každém zvýšení teploty byl ponechán prostor 10 minut pro prohřátí a pozorování. Na ethylen vinyl acetátové vrstvě nebyla pozorována žádná změna, což bylo potvrzeno i mechanickým testem odolnosti vrypu skalpelem.

Měření 3: V sušičce bylo nasimulováno vakuum vytvoření a udržováním podtlaku 98000 Pa. Článek tenkovrstvého solárního modulu byl zahříván z pokojové teploty 25 °C až po maximální možnou teplotu sušičky 250 °C. Za těchto podmínek byl vzorek ponechán dvě hodiny. Na ethylen vinyl acetátové vrstvě nebyla pozorována žádná změna, což bylo potvrzeno i mechanickým testem odolnosti vrypu skalpelem.



Obrázek 5.1 Výsledek měření č.3

5.1.2 Vyhodnocení experimentu

Experimentem jsem se snažil ověřit, že ethylen vinyl acetát jde roztavit ve vysoké teplotě. Výsledky prokázaly, že sušička o maximální teplotě 250 °C, ani za použití podtlaku pro simulaci vakua, nedosahuje dostatečných hodnot pro ovlivnění ethylen vinyl acetátové vrstvy. Bylo tedy nutno zvolit jiné zařízení, které je schopné dosáhnout vyšších tepelných hodnot.

Článek časopisu Journal of Applied Polymer Science z roku 1997 popisuje změny struktury ethylen vinyl acetátu způsobené teplotou. Článek uvádí, že tepelné vlastnosti ethylen vinyl acetátových kopolymerů se mění dle procentuálního obsahu vinyl acetátové složky a krystalizaci částic. Dále naznačuje, že k roztavení již laminované vrstvy bude zapotřebí větší teploty, než je sušička schopna [43].

5.2 Experiment 2 – vliv vysokých teplot

Pro tuto sadu měření byla použita vysokoteplotní vakuová pec Classic, vzorky tenkovrstvého solárního moduly, kovový stojan, Petriho miska.

Cílem těchto měření bylo navázat na experiment 1 a určit teplotu, při které dojde k dostatečné degradaci ethylen vinyl acetátové vrstvy pro odstranění skla z modulu. Dále bylo cílem ověřit vliv vakua na prováděný experiment.

Testovaný tenkovrstvý solární modul byl stabilně umístěn na kovovém stojanu. Ten byl následně postaven do dostatečně velké Petriho misky tak, aby nedošlo k případnému

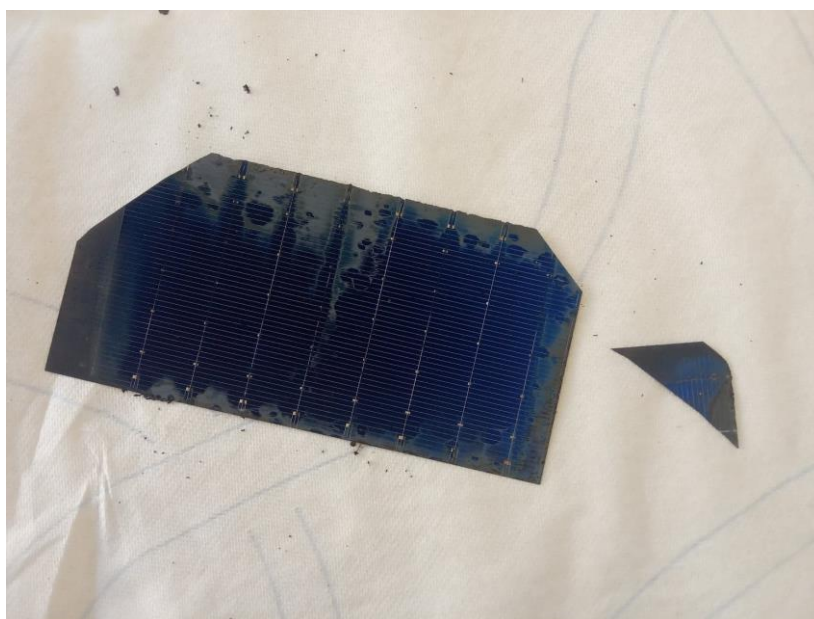
znečištění vnitřku vakuové pece. Celá sestava byla následně vložena do vakuové pece. Následovalo postupné zvyšování teploty o 3 °C za minutu. Po ukončení tepelného zahřívání byl vzorek ponechán k vychladnutí v peci pro jeho bezpečné vytažení. Po vytažení byl proveden mechanický test vrypem skalpelu na ethylen vinyl acetátové vrstvě spolu pokusem o ruční odebrání skla. Pro měření, kdy byl testován vliv vakua na experiment, byl před zahříváním pomocí pumpy uvnitř komory vytvořen podtlak, čímž bylo simulováno vakuum. Podtlak bylo nutno pravidelně udržovat. Na každé měření byl použit nový vzorek.

5.2.1 Provedená měření

Měření 1: Vzorek byl postupně zahříván z pokojové teploty 25 °C na teplotu 400 °C, ve které byl ponechán dvě hodiny. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 3 °C za minutu. Došlo ke kompletnímu shoření tedlarové vrstvy vzorku, a kompletnímu roztopení ethylen vinyl acetátové vrstvy. Rozpadlé a ohořelé sklo bylo možno volně odebrat rukou bez použití síly. Pokus doprovázel vznik zplodin.



Obrázek 5.2 Výsledek měření č.1 – vytažený vzorek



Obrázek 5.3 Výsledek měření č.4 – holý solární článek

Měření 2: Nový vzorek byl postupně zahříván z pokojové teploty 25 °C na teplotu 300 °C, ve které byl ponechán 2 hodiny. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 3 °C za minutu. Došlo ke spálení tedlarové vrstvy vzorku, ethylen vinyl acetátová vrstva neprojevila známky roztavení. Ohořelé sklo zůstalo pevně držet. Pokus doprovázel vznik zplodin.

Měření 3: Nový vzorek byl postupně zahříván z pokojové teploty 25 °C na teplotu 350 °C, ve které byl ponechán dvě hodiny. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 3 °C za minutu. Došlo ke spálení tedlarové vrstvy vzorku. Většina ethylen vinyl acetátové vrstvy se roztavila, malá část zůstala na skle a stojanu. Ohořelé sklo se dalo lehkou silou odebrat. Pokus doprovázel vznik zplodin.

Měření 4: Vzorek byl postupně zahříván z pokojové teploty 25 °C na teplotu 340 °C, ve které byl ponechán 2 hodiny. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 3 °C za minutu. Došlo ke spálení tedlarové vrstvy vzorku, ethylen vinyl acetátová vrstva se roztekla. Ohořelé sklo se dalo lehkou silou odebrat. Pokus doprovázel vznik zplodin.

Měření 5: Vzorek byl postupně zahříván z pokojové teploty 25 °C na teplotu 330 °C, ve které byl ponechán dvě hodiny. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 3 °C za minutu. Došlo k roztečení tedlarové vrstvy vzorku, ethylen vinyl acetátová vrstva se neroztekla. Ohořelé sklo zůstalo pevně držet. Pokus doprovázel vznik zplodin.

Měření 6: Uvnitř pece bylo nasimulováno vakuum vytvořením a udržováním podtlaku o přibližné hodnotě 90 000 Pa. Vzorek byl postupně zahříván z pokojové teploty 25 °C na teplotu 330 °C, ve které byl ponechán dvě hodiny. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 3 °C za minutu. V peci nebylo možno udržet stabilní

teplotu 330 °C, což bylo s největší pravděpodobností způsobeno neustálým klesáním a stoupáním tlaku. Došlo k velkému roztečení tedlarové vrstvy vzorku, ethylen vinyl acetátová vrstva jevila částečné známky roztavení, sklo se dalo větší fyzickou silou oddělit a jevila známky ohoření. Není jisté, zda roztopení ethylen vinyl acetátové vrstvy bylo způsobeno tlakem, nebo vysokými hodnotami tepla v peci. Pokus doprovázel vznik zplodin.

5.2.2 Vyhodnocení experimentu

Experimentem jsem se opět snažil ověřit, že ethylen vinyl acetát jde roztavit ve vysoké teplotě. Pomocí měření byla určena teplota 340 °C, při které dochází k dostatečnému roztavení ethylen vinyl acetátové vrstvy, a je umožněno oddělení skla za použití minimální fyzické síly. U pokusu, kdy byl testován vliv vakua, přestože došlo k dostatečnému roztavení ethylen vinyl acetátové vrstvy, aby bylo možné sklo oddělit, vzhledem k projevům použití vakua nebylo možné určit, zda roztavení ethylen vinyl acetátové vrstvy bylo zapříčiněno simulovaným vakuem nebo výkyvy teploty spojené s jeho simulací.

Určená tepelná hodnota tavení ethylen vinyl acetátové vrstvy odpovídá hodnotě z článku Journal of Applied Polymer Science z roku 1997, kde bylo pomocí Floryho-Foxovy rovnice vypočtena hodnota tavení pro zkrystalizovaný ethylen vinyl acetát s různými podíly vinyl acetátové složky. Naměřené hodnotě se blíží vypočtené hodnoty pro 5 %, 10 %, a 14 % podíl vinyl acetátové složky [43].

5.3 Experiment 3 – vliv dostupných rozpouštědel

Pro tuto sadu pokusů byly použity tenkovrstvé solární moduly dodatečně upravené na vhodnou velikost, aceton, isopropyl alkohol, destilovaná voda, uzavíratelné skleněné nádoby. Byla vybrána nevýbušná a netoxická, běžně dostupná rozpouštědla, z důvodu šetrnosti vůči životnímu prostředí.

Cílem tohoto měření bylo otestovat předpoklad, že vystavení solárního modulu běžným rozpouštědlům vede ke změnám mechanických vlastností ethylen vinyl acetátové vrstvy. Dále bylo testováno, kolik rozpouštědla bude nasáknuto do vzorků modulu porovnáním váhy vzorku před a po namáčení. Posledním cílem tohoto experimentu bylo pozorovat, jak se projeví namáčení jednoho vzorku ve více rozpouštědlech. Krom měření kdy se testovaly projevy více rozpouštědel na jeden článek byl pro každé měření použit nový vzorek.

Solární moduly byly upraveny na vhodnou velikost. Každý z nich byl ponechán v uzavřené nádobě s příslušným rozpouštědlem: aceton, isopropyl alkohol, destilovaná voda. Po uplynutí 24 hodin byla testována nasákavost, změny mechanické odolnosti vrypu skalpelem a další projevy s ní spojené. U měření, kde bylo cílem pozorovat změny hmotností, předcházelo a následovalo každému namáčení vážení. Pro testování

vlivů namáčení jednoho vzorku do více rozpouštědel následovalo vždy po každých 24 hodinách namáčení 48 hodin na osušení před dalším namáčením.

5.3.1 Provedená měření

Měření 1: Šest kusů solárního modulu bylo upraveno na vhodnou velikost. Ty byly následně po dvou ponechány v uzavřené nádobě s příslušným rozpouštědlem: aceton, isopropyl alkohol, destilovaná voda. Po 24 hodinách byly moduly odebrány a byl proveden test mechanických vlastností etylen vinyl acetátové vrstvy vrypu skalpelem. Žádný z namáčených modulů neprojevil v porovnání s nenamáčeným vzorkem změnu mechanických vlastností etylen vinyl acetátové vrstvy.

Měření 2: Šest kusů solárního modulu bylo upraveno na vhodnou velikost. Ty byly zváženy a následně po dvou ponechány v uzavřené nádobě s příslušným rozpouštědlem: aceton, isopropyl alkohol, destilovaná voda. Vzorek 1 a 2 byly vloženy do acetonu, vzorek 3 a 4 do isopropyl alkoholu a vzorek 5 a 6 do destilované vody. Po 24 hodinách byly moduly odebrány a bylo provedeno opětovné vážení.

Tabulka 5.1 Přehled hmotností namáčených vzorků pro měření 2

Typ rozpouštědla	Číslo vzorku	Hmotnost před namáčením (g)	Hmotnost po namáčení (g)	Procentuální nárůst hmotností (%)
Aceton	1	27,02	28,84	6,32
Aceton	2	29,54	30,56	3,34
Isopropyl alkohol	3	29,11	27,45	-5,71
Isopropyl alkohol	4	28,84	27,87	-3,37
Destilovaná voda	5	27,27	27,06	-0,78
Destilovaná voda	6	26,66	29,58	9,88

Měření ukázalo, že přibližná průměrná procentuální hodnota namáčení pro aceton je 4,83 %, pro isopropyl alkohol -4,54 % a pro destilovanou vodu 4,55 %. Vzhledem k výrazné odlišnosti výsledků mezi páry modulů je nutno označit tento pokus za nepovedený. Tyto nepřiměřené odchylky by se daly vysvětlit odpadem části modulu v nádobě, ovšem žádné odpadlé části po namáčení přítomny nebyly. Z toho vyplývá, že chyba nastala během vážení článku před namáčením či po něm.

Měření 3: Šest kusů solárního modulu bylo upraveno na vhodnou velikost. Ty byly zváženy a následně po dvou ponechány v uzavřené nádobě s příslušným rozpouštědlem: aceton, isopropyl alkohol, destilovaná voda. Vzorek 1 a 2 byly vloženy do acetonu, vzorek 3 a 4 do isopropyl alkoholu a vzorek 5 a 6 do destilované vody. Po 24 hodinách byly moduly odebrány a bylo provedeno opětovné vážení.

Tabulka 5.2 Přehled hmotností namáčených vzorků pro měření 3

Typ rozpouštědla	Číslo vzorku	Hmotnost před namáčením (g)	Hmotnost po namáčení (g)	Procentuální nárůst hmotností (%)
Aceton	1	27,56	28,16	2,14
Aceton	2	30,82	31,42	1,91
Isopropyl alkohol	3	27,68	27,82	0,51
Isopropyl alkohol	4	28,50	28,60	0,35
Destilovaná voda	5	28,46	28,48	0,08
Destilovaná voda	6	27,05	27,09	0,15

Měření ukázalo, že přibližná průměrná procentuální hodnota namáčení pro aceton je 2,02 %, pro isopropyl alkohol 0,43 % a pro destilovanou vodu 0,11 %. Je potřeba provést opakované měření pro potvrzení naměřených hodnot.

Měření 4: Šest kusů solárního modulu bylo upraveno na vhodnou velikost. Ty byly zváženy a následně po dvou ponechány v uzavřené nádobě s příslušným rozpouštědlem: aceton, isopropyl alkohol, destilovaná voda. Vzorek 1 a 2 byly vloženy do acetonu, vzorek 3 a 4 do isopropyl alkoholu a vzorek 5 a 6 do destilované vody. Po 24 hodinách byly moduly odebrány a bylo provedeno opětovné vážení.

Tabulka 5.3 Přehled hmotností namáčených vzorků pro měření 4

Typ rozpouštědla	Číslo vzorku	Hmotnost před namáčením (g)	Hmotnost po namáčení (g)	Procentuální nárůst hmotností (%)
Aceton 1	1	26,77	27,30	1,95
Aceton 2	2	27,94	28,57	2,21
Isopropyl alkohol 1	3	28,22	28,32	0,36
Isopropyl alkohol 2	4	27,32	27,43	0,41
Destilovaná voda 1	5	28,64	28,67	0,11
Destilovaná voda 2	6	28,20	28,23	0,11

Měření ukázalo, že průměrná procentuální hodnota namáčení pro aceton je 2,08 %, pro isopropyl alkohol 0,39 % a pro destilovanou vodu 0,11 %.

Měření 5: Tři kusy solárního modulu bylo upraveno na vhodnou velikost. Ty byly zváženy a následně po dvou ponechány v uzavřené nádobě s příslušným rozpouštědlem: aceton, isopropyl alkohol, destilovaná voda. Po 24 hodinách byly moduly odebrány a bylo provedeno opětovné vážení. Moduly byly ponechány 48 hodin k prosušení

a následovalo testování namáčení v dalším rozpouštědle. Každý modul byl otestován ve všech rozpouštědlech. Toto měření navazovalo přímo na měření 4.

Tabulka 5.4 Přehled hmotností namáčených vzorků pro měření 5

Číslo modulu a typ rozpošutědla	Hmotnost před namáčením (g)	Hmotnost po namáčení (g)	Procentuální nárůst hmotností (%)
Modul 1 v acetonu	27,94	28,57	2,21
Modul 2 v isopropyl alkoholu	27,32	27,43	0,41
Modul 3 v destilované vodě	28,20	28,23	0,11
Modul 1 v isopropyl alkoholu	28,04	28,22	0,63
Modul 2 v destilované vodě	27,36	27,38	0,08
Modul 3 v acetonu	28,20	28,80	2,09
Modul 1 v destilované vodě	28,09	28,12	0,11
Modul 2 v acetonu	27,36	27,84	1,73
Modul 3 v isopropyl alkoholu	28,35	28,51	0,57

5.3.2 Vyhodnocení experimentu

Experimentem jsem se snažil zjistit vlivy dostupných rozpouštědel na ethylen vinyl acetát a jeho tavný proces. Bylo prokázáno, že namáčení v acetonu, isopropyl alkoholu a destilované vodě nemá zjevný vliv na mechanické vlastnosti ethylen vinyl acetátovou vrstvu. Hodnoty naměřené v měření 13 se s drobnou odchylkou shodují s naměřenými hodnotami v měření 12, tudíž je můžeme považovat za správné hodnoty modulu pro nasákavosti rozpouštědel, jmenovitě pro aceton přibližně 2 %, pro isopropyl alkohol přibližně 0,4 % a pro destilovanou vodu přibližně 0,11 %. Výsledky měření 14 naznačily, že namáčení v acetonu může způsobovat lepší nasákavé vlastnosti modulu. Tuto hypotézu je nutno ověřit vícero měřeními.

Podobný experiment byl popsán v časopise Solar Energy Materials and Solar Cells v roce 2001. Tehdejší experiment popisuje vlivy různých organických rozpouštědel na nezatavených a zatavených vzorcích ethylen vinyl acetátu. Podobně jako v mém experimentu, vystavení acetonu a isopropyl alkoholu nemělo žádný pozorovatelný účinek [44].

5.4 Experiment 4 – vliv vysoké teploty a dusíku

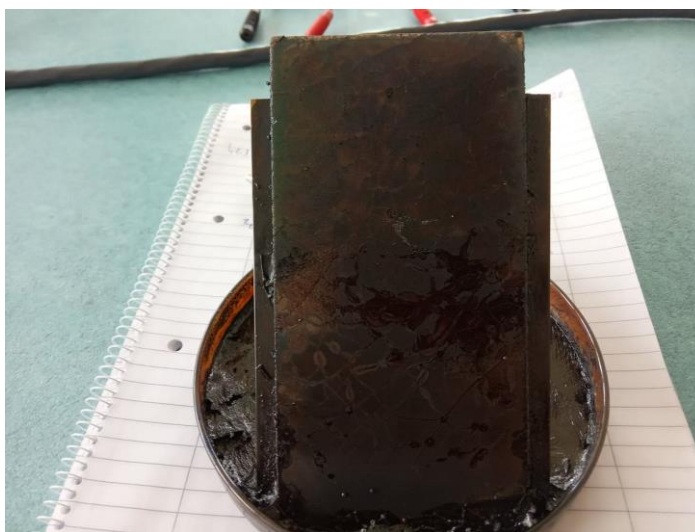
Pro tuto sadu měření byla použita vysokoteplotní vakuová pec Classic, tenkovrstvé solární moduly, tlaková láhev s plynným dusíkem, kovový stojan, Petriho miska.

Cílem této metody je zopakovat měření použitá v metodě 2 v dusíkové atmosféře namísto kyslíku. Bylo předpokladem, že tato atmosféra by měla zabránit hoření, čímž by mělo dojít jen k tavení. Tím by se mělo zabránit rozpadu skla. Dalším cílem bylo pozorovat vliv namáčení ve vybraných rozpouštědlech na proces tavení.

Testovaný tenkovrstvý solární modul byl stabilně umístěn na kovovém stojanu. Ten byl následně postaven do dostatečně velké Petriho misky tak, aby nedošlo k případnému znečištění vnitřku vakuové pece. Celá sestava byla následně vložena do vakuové pece. Vnitřní prostor pece byl zaplněn dusíkem. Následovalo postupné zvyšování teploty o 3 °C za minutu. Po ukončení tepelného zahřívání byl vzorek ponechán k vychladnutí v peci pro jeho bezpečné vytažení. Po vytažení byl proveden mechanický test vrypem skalpelu na ethylen vinyl acetátové vrstvě spolu pokusem o ruční odebrání skla. Stejný experiment byl proveden i pro vzorky modulů, které byly před testováním v peci ponechány 24 hodin v rozpouštědle.

5.4.1 Provedená měření

Měření 1: Vzorek byl uzavřen do pece do dusíkové atmosféry a postupně zahříván z pokojové teploty 25 °C na teplotu 340 °C, ve které byl ponechán dvě hodiny. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 3 °C za minutu. Došlo k roztavení ethylen vinyl acetátové vrstvy, sklo zůstalo vcelku, dalo se oddělit rukou bez namáhání. Ačkoliv k hoření nemohlo dojít z důvodu nepřítomnosti kyslíku, sklo zčernalo. Na povrchu článku se utvořil neznámý poprach. Pokus doprovázel vznik zplodin.



Obrázek 5.4 Výsledek měření č.1



Obrázek 5.5 Výsledek měření 1: vcelku odebrané sklo

Měření 2: Vzorek byl uzavřen v keramické peci do dusíkové atmosféry a postupně zahříván z pokojové teploty 25 °C na teplotu 330 °C, ve které byl ponechán dvě hodiny. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 3 °C za minutu. Ethylen vinyl acetátová vrstva se neroztavila, sklo pevně drželo. Sklo opětovně zčernalo. Na povrchu článku se opět utvořil neznámý poprach. Pokus doprovázel vznik zplodin.

Měření 3: Vzorek byl uzavřen v keramické peci do dusíkové atmosféry a postupně zahříván z pokojové teploty 25 °C na teplotu 340 °C, ve které byl ponechán dvě hodiny. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 3 °C za minutu. Došlo k částečnému roztavení ethylen vinyl acetátové vrstvy, sklo zůstalo vcelku, dalo se oddělit větší silou. Sklo opětovně zčernalo. Na povrchu článku se opět utvořil neznámý poprach. Pokus doprovázel vznik zplodin.

Měření 4: Vzorek byl uzavřen v keramické peci do dusíkové atmosféry a postupně zahříván z pokojové teploty 25 °C na teplotu 340 °C, ve které byl ponechán dvě hodiny. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 3 °C za minutu. Došlo k částečnému roztavení ethylen vinyl acetátové vrstvy, sklo zůstalo vcelku, dalo se oddělit větší silou. Sklo opětovně zčernalo. Na povrchu článku se opět utvořil neznámý poprach. Pokus doprovázel vznik zplodin.

Měření 5: Tři vzorky modulu namáčené v rozpouštědlech z měření 13 byly po ukončení namáčení uzavřeny v keramické peci do dusíkové atmosféry a postupně zahřívány z teploty 35 °C na teplotu 340 °C, ve které byly ponechány dvě hodiny. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 3 °C. Došlo k roztavení ethylen vinyl acetátové vrstvy, ale vzorky se sesunuly na jednu hromadu, kde se promíchaly mezi sebou. Kvůli tomu nebylo možno určit, zda má nasáknutí v rozpouštědle vliv na vlastnosti ethylen vinyl acetátové vrstvy. Bylo nutno pokus

opakovat. Sklo opětovně zčernalo. I nyní se na povrchů článků utvořil neznámý poprach. Pokus doprovázel vznik zplodin.

Měření 6: Dva upravené vzorky modulu byly namáčené 24 hodin v acetonu a isopropyl alkoholu. Po ukončení namáčení byly uzavřeny v keramické peci do dusíkové atmosféry a postupně zahřívány z teploty 33 °C na teplotu 340 °C, ve které byly ponechány dvě hodiny. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 3 °C za minutu. U obou modulů došlo k částečnému roztavení ethylen vinyl acetátové vrstvy, sklo bylo možné lehkou silou oddělit. Sklo opětovně zčernalo. na povrchu článku se opět utvořil neznámý poprach. Pokus doprovázel vznik zplodin.

Měření 7: Jeden vzorek upravený modulu byl namáčen 24 hodin v acetonu. Po uplynuté době namáčení byl spolu s nenamáčeným vzorkem modulu uzavřen do pece do dusíkové atmosféry a postupně zahříván z teploty 25 °C na teplotu 340 °C, ve které byly ponechány dvě hodiny. Zahřívání probíhalo postupným zvyšováním teploty o 3 °C za minutu. U obou modulů došlo k částečnému roztavení ethylen vinyl acetátové vrstvy, sklo bylo možné lehkou silou oddělit. Sklo opětovně zčernalo. na povrchu článku se opět utvořil neznámý poprach. Pokus doprovázel vznik zplodin.

5.4.2 Vyhodnocení experimentu

Cílem experimentu bylo pozorovat změny v procesu tavení ethylen vinyl acetátu v dusíkové atmosféře. Bylo prokázáno, že za využití dusíkové atmosféry nedojde k hoření, ale působením vysoké teploty dojde k termickým reakcím. Použití dusíkové metody je výhodné z hlediska redukce zplodin, které by jinak během hoření vznikly ve větší míře. Prvotní testy nasakovaných článků prokázaly, že aceton, isopropyl alkohol a destilovaná voda nemají projev na termické vlastnosti. Bohužel se nepovedlo opakovaně dosáhnout oddělení skla od zbytku modulu, aniž by se rozsypalo. Je možné, že sklo se rozsypává na části z důvodu celkového popraskání, které vzniklo během řezání natlakovanou vodou. Během experimentů na vzorcích modulu, které byly namáčené v rozpouštědlech, nebyl pozorován rozdíl oproti měření na modulech, které nebyly namáčené.

5.5 Experiment 5 – pozorování vzorků elektronovým mikroskopem

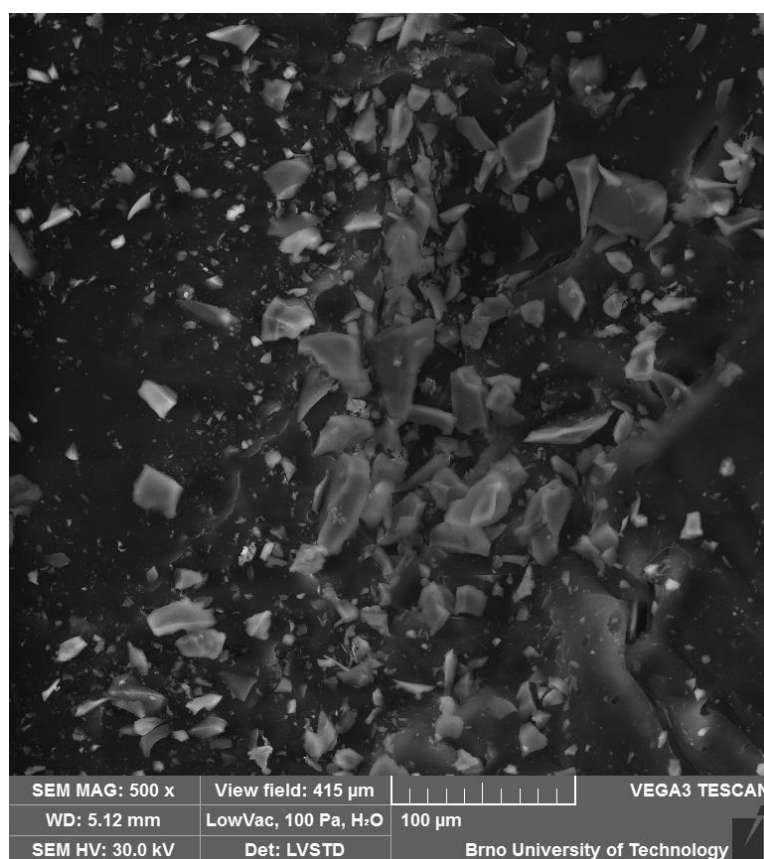
Abychom zjistili, jak se tepelné experimenty projeví na struktuře ethylen vinyl acetátu, byl pro pozorování vzorků použit rastrovací elektronový mikroskop SEM VEGA 3 XMU Tescan (s LaB6 katodou), detektor Brucker X flash 6 |10, vzorek ethylen vinyl acetátové vrstvy z nařezaného vzorku, vzorek rozteklé ethylen vinyl acetátové vrstvy a vzorek neznámého poprachu z povrchu článku.

Abychom zjistili, jak se mění struktura ethylen vinyl acetátu po roztavení ve vysoké teplotě, byla použita elektronová mikroskopie. Cílem pozorování elektronovou

mikroskopií je získat vzhled ethylen acetátové vrstvy ze vzorku modulu, vzhled rozteklé ethylen vinyl acetátové vrstvy a také vzhled neznámého poprachu, porovnat je mezi sebou a určit, zda se jedná o vypařenou a usazenou ethylen vinyl acetátovou vrstvu. Dále je cílem určit složení vzorku ethylen vinyl acetátové vrstvy z modulu, rozteklé ethylen vinyl acetátové vrstvy a porovnat je spolu se složením neznámého poprachu.

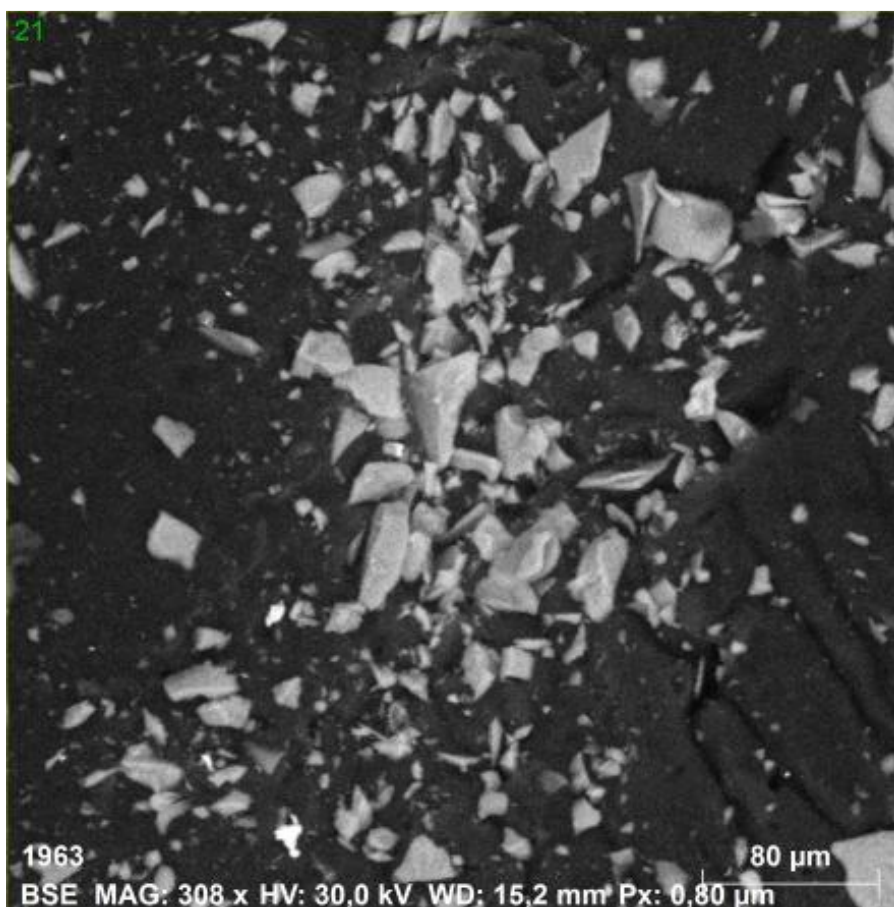
Odebrané vzorky ethylen vinyl acetátu ze solárního modulu, rozteklé ethylen vinyl acetátové vrstvy a vzorky neznámého poprachu podstoupili analýzu rastrovacím elektronovým mikroskopem. Dále byla provedena spektroskopie k určení složení vzorků.

5.5.1 Rozbor vzorku ethylen vinyl acetátu z modulu



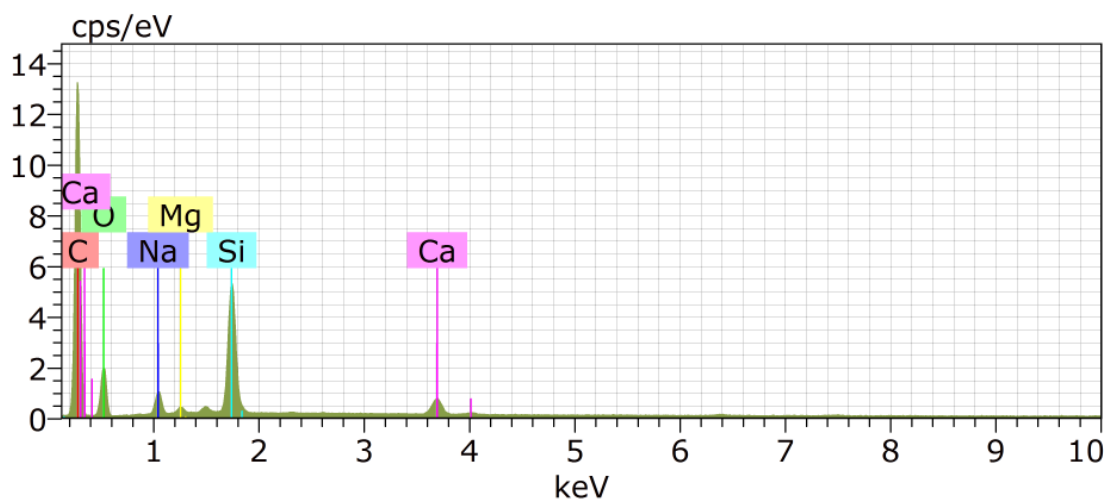
Obrázek 5.6 Detail vzorku ethylen vinyl acetátu odebraného z modulu o velikosti 415 μm x 415 μm

Pozorovaný vzorek byl odebrán z tenkovrstvého solárního modulu. Nejdříve bylo nutno odstranit ochranné sklo a následně vrstvu odstříhnout. Na snímku lze pozorovat povrch ethylen vinyl acetátové vrstvy. Povrch vzorku je převážně hladký. Přestože byl povrch vzorku skalpelem očištěn, lze na něm pozorovat krystalky. Dá se předpokládat, že se jedná o střípky ochranného skla.



Obrázek 5.7 Detail vzorku ethylen vinyl acetátu z modulu pro spektroskopii

Pro účely spektroskopie byla vybrána oblast s dostatečnou plochou ethylen vinyl acetátu a uskupením krystalků. Ze získaných dat byly určeny prvky, které bylo možné na pozorovaném vzorku určit a byla vytvořena tabulka jejich zastoupení. Ze získaných hodnot byl také vytvořen barevný snímek, který ukazuje zastoupení a umístění prvků na vzorku.

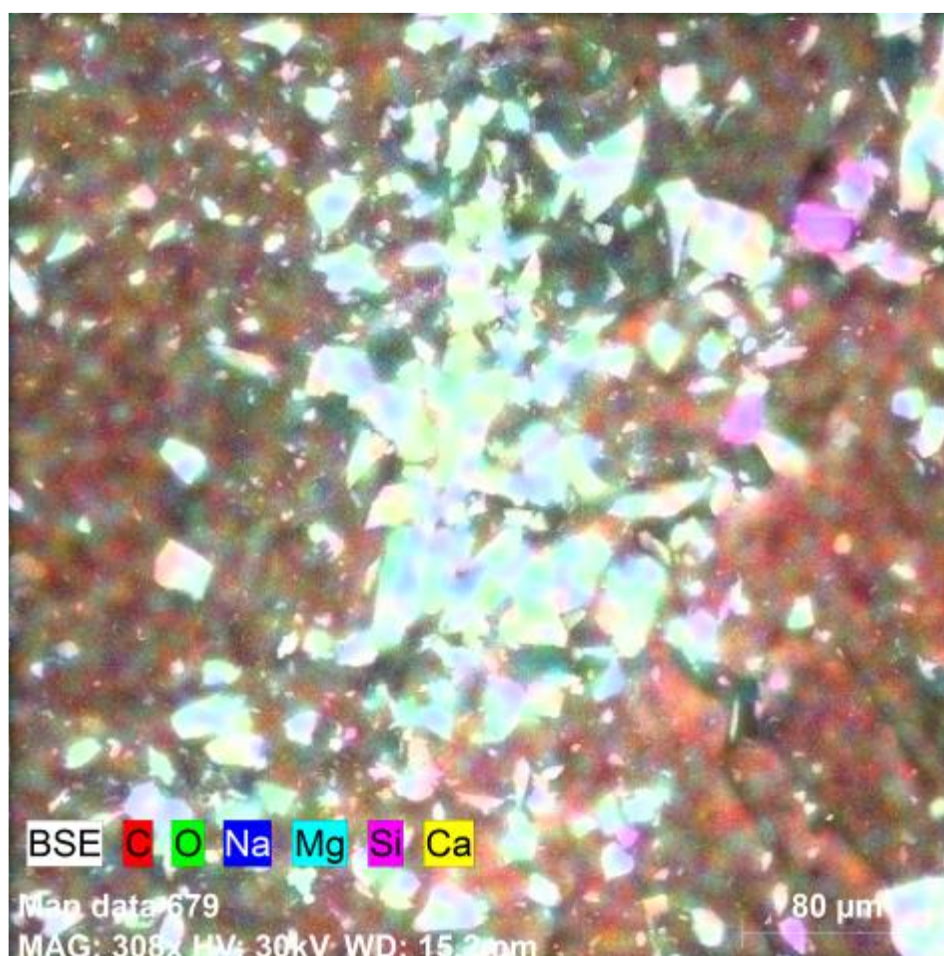


Obrázek 5.8 Grafické znázornění výsledku spektrometrie

Tabulka 5.5 Tabulka hodnot zjištěných spektrometrií

Prvek	Uhlík	Kyslík	Sodík	Křemík	Vápník	Hořčík
Protonové číslo	6	8	11	14	20	12
Série	K-series	K-series	K-series	K-series	K-series	K-series
Norm. koncentrace (hmotnostní %)	70,95	22,70	1,72	3,68	0,61	0,34
Atom. Koncentrace (poměrové %)	78,12	18,77	0,99	1,73	0,20	0,18
Error Sigma 3, absolutní chyba (%)	23,34	8,40	0,43	0,57	0,13	0,14

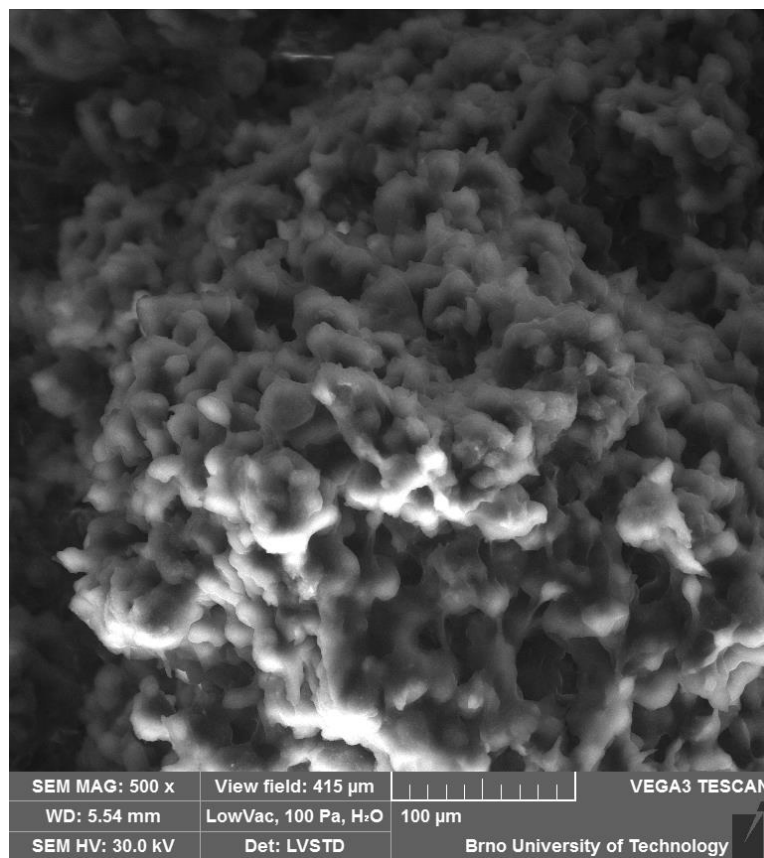
Spektrometrií bylo zjištěno, že odebraný vzorek ethylen vinyl acetátu z modulu se skládá převážně z uhlíku a kyslíku. Dále bylo zaznamenáno stopové množství sodíku, křemíku, vápníku a hořčíku. Dominantní zastoupení uhlíku odpovídá složení ethylen vinyl acetátu. Přítomnost kyslíku je možno vysvětlit vystavení vzorku pokojové atmosféře či příměsí, které se k výrobě skla používají. Příměsí vysvětlují také přítomnost sodíku, křemíku, vápníku i hořčíku. Jako příměsí se používá uhličitan sodný, oxid křemičitý, oxid vápenatý a oxid hořečnatý.



Obrázek 5.9 Detail vzorku ethylen vinyl acetátu odebraného z modulu vizuálně znázorňující prvkové složení zjištěné spektrometrií

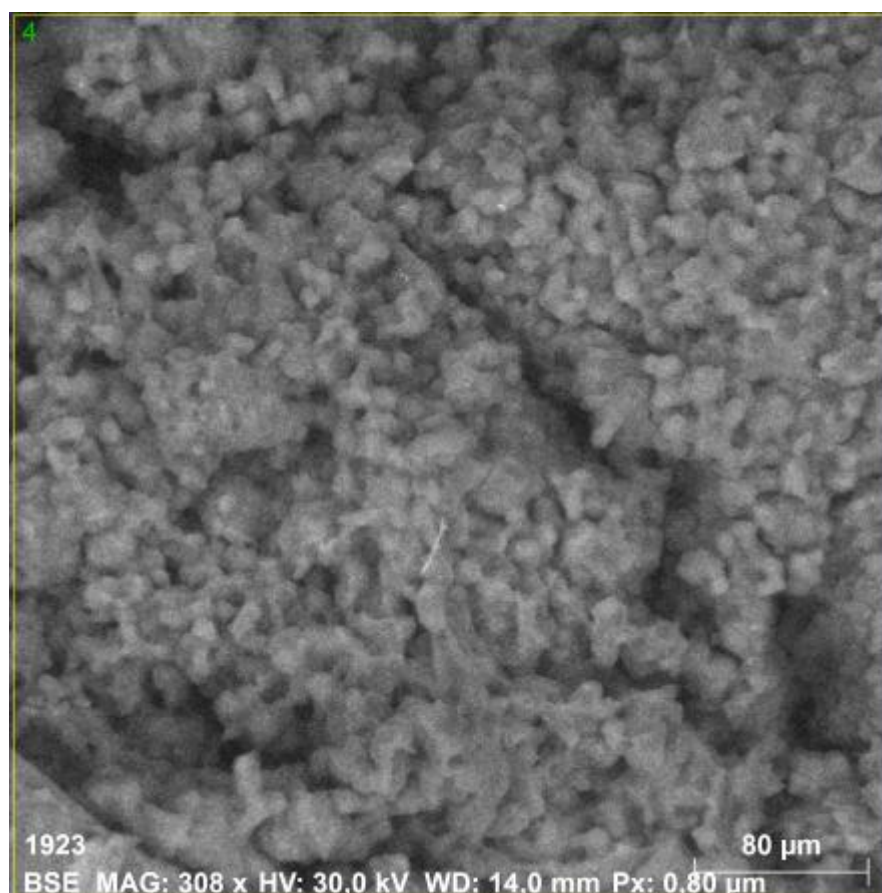
Vizuální znázorněním prvků potvrdilo, že krystalky shluknuté ve středu fotografie budou střípky skla. Dále z něj lze vyčíst, že materiál, ve kterém jsou krystaly zabodnuté a okolo nich, je ethylen vinyl acetát.

5.5.2 Rozbor roztaveného ethylen vinyl acetátu



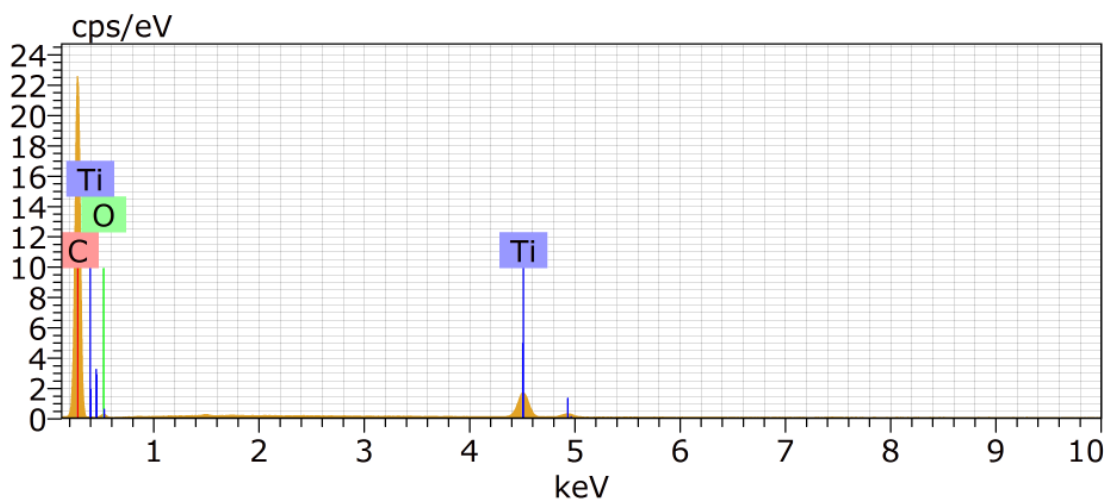
Obrázek 5.10 Detail roztaveného vzorku ethylen vinyl acetátu o velikosti 415 μm x 415 μm

Pozorovaný vzorek byl odebrán z Petriho misky po ukončení experimentu v keramické peci. Na snímku lze pozorovat povrch ethylen vinyl acetátové vrstvy po zahřátí na 340 °C v dusíkové atmosféře. Povrch vzorku je tvořen sférickými zrny, která jsou propojena mezi sebou. Na první pohled není patrná žádná jiná struktura.



Obrázek 5.11 Detail vzorku roztaveného ethylen vinyl acetátu pro spektroskopii

Vzhledem k pravidelnosti povrchu vzorku byla pro účely spektroskopie vybrána náhodná oblast roztaveného ethylen vinyl acetátu. Ze získaných dat byly určeny prvky, které bylo možné na pozorovaném vzorku určit a byla vytvořena tabulka jejich zastoupení. Ze získaných hodnot byl také vytvořen barevný snímek, který ukazuje zastoupení a umístění prvků na vzorku.

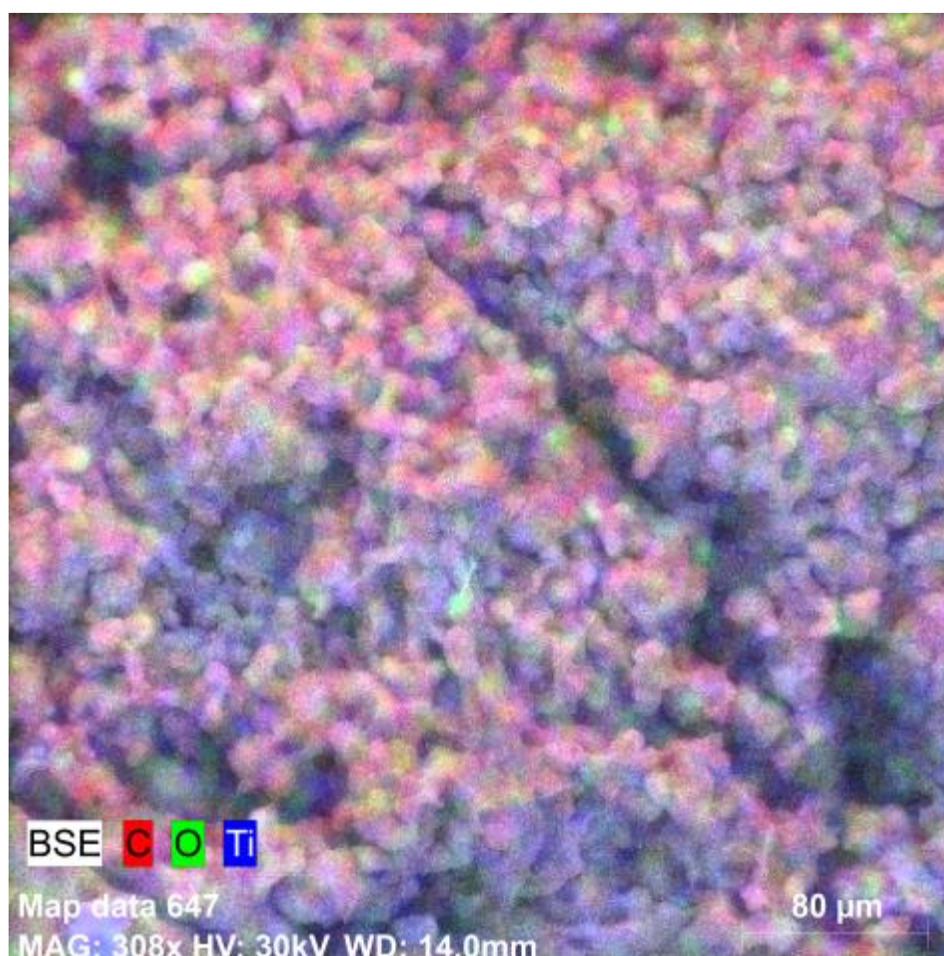


Obrázek 5.12 Grafické znázornění výsledku spektrometrie

Tabulka 5.6 Tabulka hodnot zjištěných spektrometrií

Prvek	Uhlík	Kyslík	Titanium
Protonové číslo	6	8	22
Série	K-series	K-series	K-series
Norm. koncentrace (hmotnostní %)	92,14	5,30	2,56
Atom. Koncentrace (poměrové %)	95,23	4,11	0,66
Error Sigma 3, absolutní chyba (%)	29,51	2,53	0,29

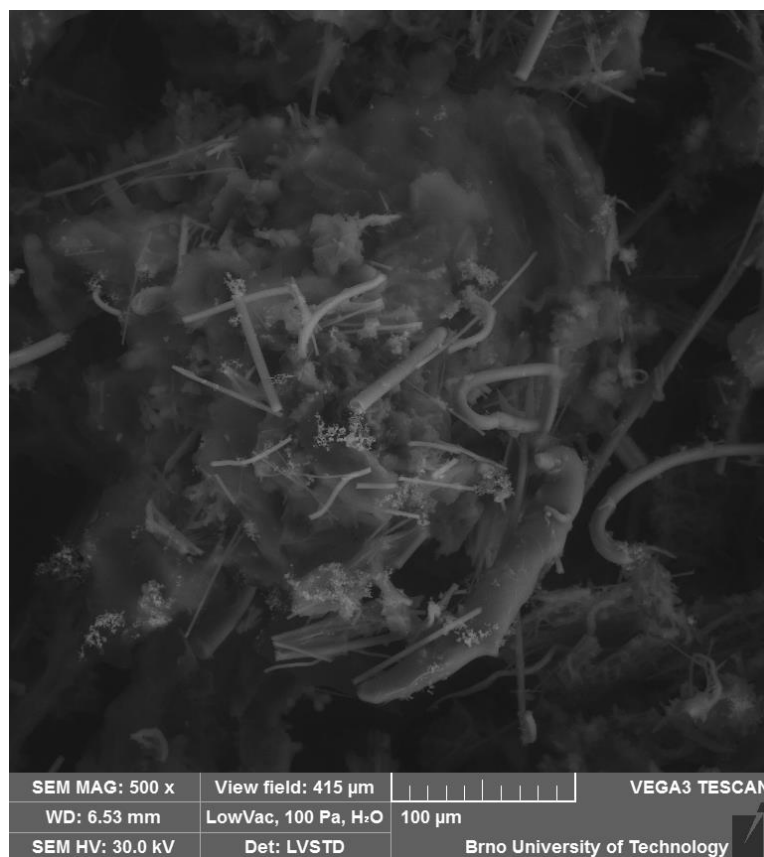
Spektrometrií bylo zjištěno, že odebraný vzorek rozteklé ethylen vinyl acetátové vrstvy se skládá z uhlíku, kyslíku a titania, přičemž uhlík je v zastoupení dominantní. Přítomnost kyslíku se dá vysvětlit vystavením vzduchu či proběhlou oxidací. Stopové množství titania mohlo být způsobeno nanesením během nařezávání natlakovanou vodou.



Obrázek 5.13 Detail vzorku roztaveného ethylen vinyl acetátu vizuálně znázorňující prvkové složení zjištěné spektrometrií

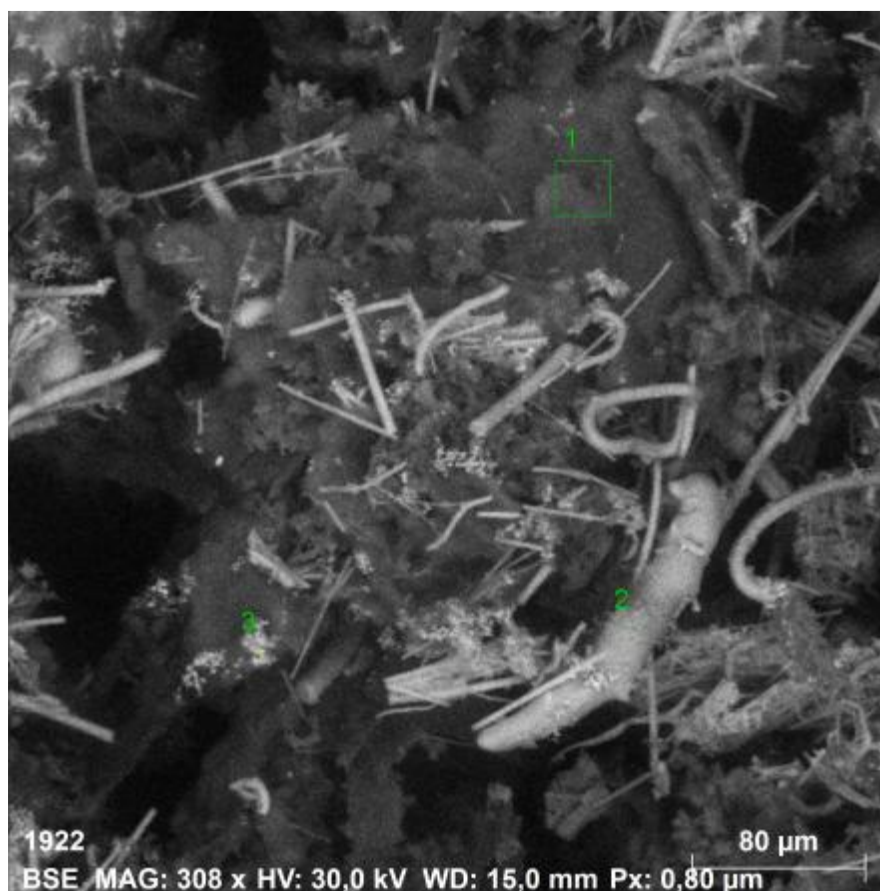
Vizuální znázornění prvků prokázalo, že struktura je tvořena převážně ethylen vinyl acetátem. Na ní lze pozorovat zachycený kyslík a stopovou přítomnost titánie.

5.5.3 Pozorování poprachu usazeného na povrchu modulu po měření v keramické peci v dusíkové atmosféře



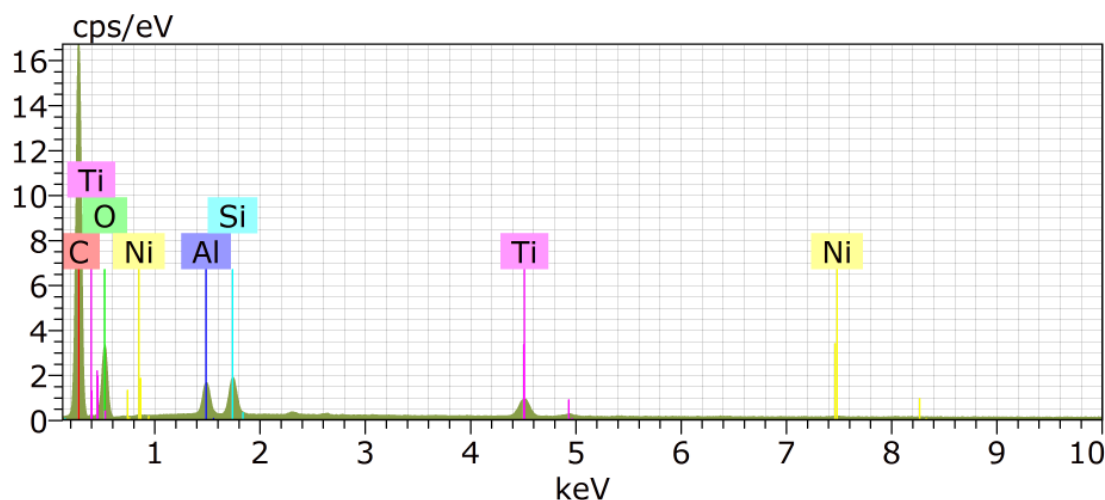
Obrázek 5.14 Detail poprachu usazeného na povrchu modulu po měření v keramické peci v dusíkové atmosféře o velikosti 415 μm x 415 μm

Pozorovaný vzorek byl odebrán pinzetou z povrchu vzorku modulu, který byl vytažen z keramické pece po vystavení teplotě 340 °C v dusíkové atmosféře. Na snímku lze pozorovat velké zrno, na kterém je zachyceno velké množství malých objektů připomínajících vlákna.



Obrázek 5.15 Detail vzorku poprachu usazeného na povrchu modulu po měření v keramické peci v dusíkové atmosféře se třemi vybranými segmenty pro provedení spektrometrie

Na vzorku byly vybrány tři segmenty (oblasti), které na první pohled vystupují svým tvarem. Na těchto segmentech byla provedena prvková analýza. Ze získaných dat byly určeny prvky, ze kterých se dané segmenty a tudíž i zbytek vzorku skládají. Byla vytvořena tabulka prvkového zastoupení pro každý segment. Ze získaných hodnot byl také vytvořen barevný snímek celého vzorku, který ukazuje zastoupení a umístění prvků na vzorku.

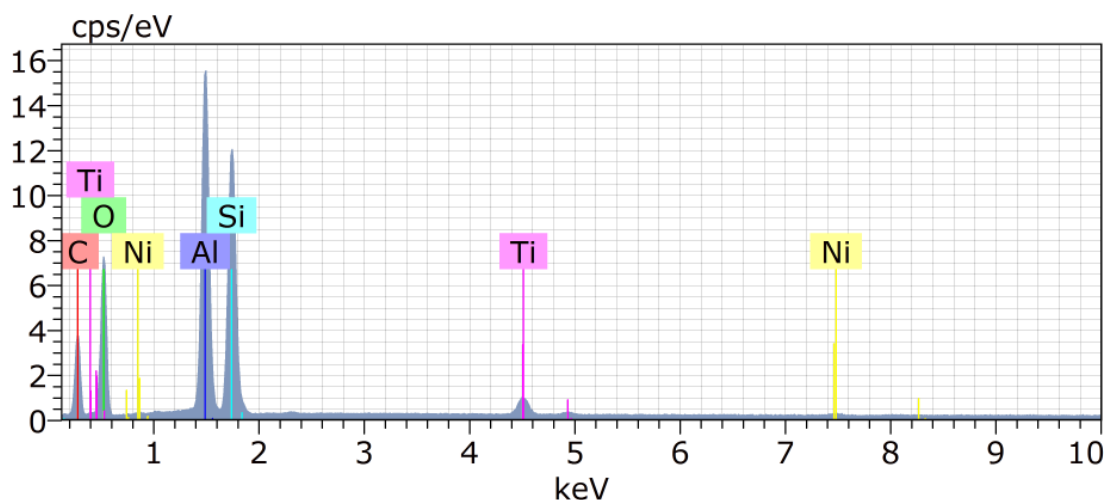


Obrázek 5.16 Grafické znázornění výsledku spektrometrie pro segment 1

Tabulka 5.7 Tabulka hodnot zjištěných spektrometrií pro segment 1

Prvek	Uhlík	Kyslík	Hliník	Křemík	Titanium	Nikl
Protonové číslo	6	8	13	14	22	28
Série	K-series	K-series	K-series	K-series	K-series	K-series
Norm. koncentrace (hmotnostní %)	67,57	29,12	0,96	1,05	0,84	0,45
Atom. Koncentrace (poměrové %)	74,57	24,12	0,47	0,50	0,23	0,10
Error Sigma 3, absolutní chyba (%)	22,13	10,45	0,22	0,22	0,15	0,11

Spektrometrií bylo zjištěno, že segment 1 se skládá převážně z uhlíku a kyslíku. Dále se zde nachází stopové množství hliníku, křemíku, titánie a niklu. Jelikož uhlík je zde v dominantním zastoupení, můžeme vyvodit, že je plocha tvořena převážně ethylen vinyl acetátem. Stopová přítomnost titania mohla být způsobena nanesením během nařezávání natlakovanou vodou. Přítomnost ostatních kovů hliníku a niklu se dá opět vysvětlit opracováváním modulu. Modul byl velikostně upraven pomocí diamantové kotoučové brusky a je velmi pravděpodobné, že zjištěné stopové množství na vzorku je výsledek znečištění předchozího řezání či samotného diamantového kotouče.

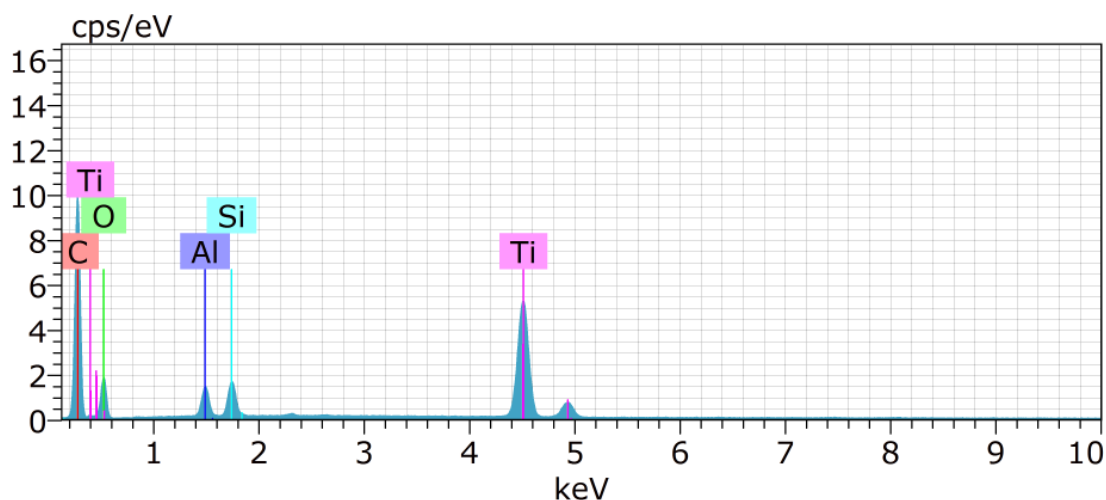


Obrázek 5.17 Grafické znázornění výsledku spektrometrie pro segment 2

Tabulka 5.8 Tabulka hodnot zjištěných spektrometrií pro segment 2

Prvek	Uhlík	Kyslík	Hliník	Křemík	Titanium	Nikl
Protonové číslo	6	8	13	14	22	28
Série	K-series	K-series	K-series	K-series	K-series	K-series
Norm. koncentrace (hmotnostní %)	35,71	42,28	9,93	9,37	0,93	1,77
Atom. Koncentrace (atmosférické %)	46,69	41,51	5,78	5,24	0,31	0,47
Error sigma 3 (hmotnostní %)	12,91	14,40	1,52	1,29	0,15	0,22

Spektrometrií bylo zjištěno, že segment 2 se skládá převážně z kyslíku a uhlíku. Dále se zde nachází větší množství hliníku, křemíku a niklu. I na tomto segmentu je stopové množství titánu. Přítomnost uhlíku se dá vysvětlit přítomností ethylen vinyl acetátu na zvoleném segmentu. Přítomnost kyslíku a křemíku se dá vysvětlit přítomností skleněných střípků na povrchu vzorku, které byly spolu s poprachem odebrány. Podobně jako u segmentu 1, přítomnost ostatních kovů hliníku a niklu se dá opět vysvětlit opracováváním modulu. Modul byl velikostně upraven pomocí diamantové kotoučové brusky a je velmi pravděpodobné, že zjištěné stopové množství na vzorku je výsledek znečištění předchozího řezání či samotného diamantového kotouče. Stejně tak mohla být i stopová přítomnost titania způsobena nanesením během nařezávání natlakovanou vodou.

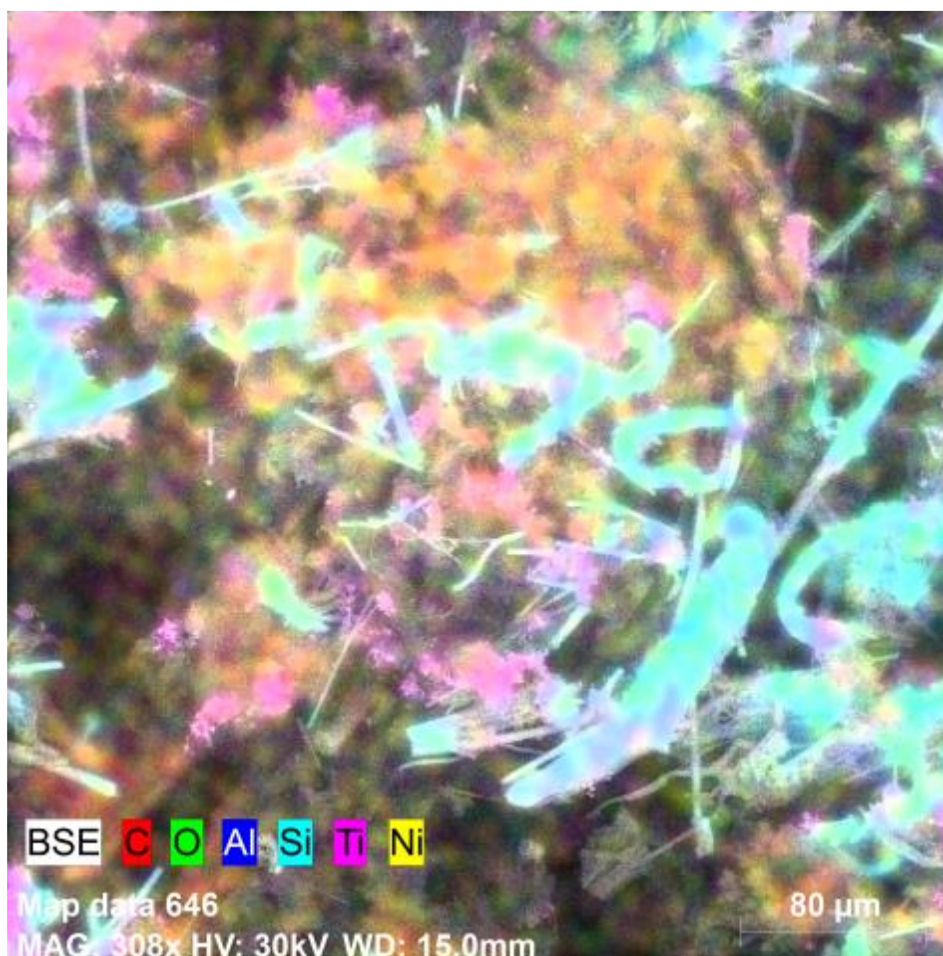


Obrázek 5.18 Grafické znázornění výsledku spektrometrie pro segment 3

Tabulka 5.9 Tabulka hodnot zjištěných spektrometrií pro segment 3

Prvek	Uhlík	Kyslík	Hliník	Křemík	Titanium
Protonové číslo	6	8	13	14	22
Série	K-series	K-series	K-series	K-series	K-series
Norm. koncentrace (hmotnostní%)	63,30	25,98	1,52	1,58	7,63
Atom. Koncentrace (atmosférické %)	73,55	22,66	0,79	0,78	2,22
Error sigma 3 (hmotnostní %)	25,78	11,83	0,36	0,34	0,84

Spektrometrií bylo zjištěno, že segment 3 se skládá převážně z uhlíku a kyslíku. Dále se zde nachází stopové množství hliníku, křemíku a titánie. Jelikož uhlík je zde v dominantním zastoupení, můžeme vyvodit, že jedná převážně o ethylen vinyl acetát. Větší přítomnost titánie mohla být způsobena nanesením během nařezávání natlakovanou vodou. Přítomnost hliníku se dá opět vysvětlit opracováváním modulu. Modul byl velikostně upraven pomocí diamantové kotoučové brusky a je velmi pravděpodobné, že zjištěné stopové množství na vzorku je výsledek znečištění předchozího řezání či samotného diamantového kotouče.



Obrázek 5.19 Detail vzorku poprachu usazeného na povrchu modulu po měření v keramické peci v dusíkové atmosféře vizuálně znázorňující prvkové složení zjištěné spektrometrií

Vizuální znázorněním prvků prokázalo, se jedná o usazený ethylen vinyl acetát, na kterém jsou nabaleny další částčky. Nejvýznamnější a nejčastější jsou střípky skla. Krom skla je na ethylen vinyl acetátu přichycen i hliník, nikl a titánium.

5.5.4 Vyhodnocení experimentu

Vzorek ethylen vinyl acetátu odebraný z modulu oproti zbylým vzorkům vystupuje svou pravidelnou a hladkou strukturou. Při porovnání struktur vzorku rozteklého ethylen vinyl acetátu a vzorku neznámého poprachu je vidět na první pohled jasný rozdíl v krystalografické struktuře. Z většinového zastoupení uhlíku na vzorku neznámého poprachu je ovšem bezpečné určit, že se jedná o usazené předem vypařené částice ethylen vinyl acetátu. Přítomnost kyslíku se dá v případech roztavené ethylen vinyl acetátové vrstvy a poprachu usazeného na povrchu modulu vysvětlit vystavením vzduchu či proběhlou oxidací. Stopová přítomnost titánia mohla být v případech roztaveného ethylen vinyl acetátu a povrchového poprachu způsobena nanesením

během nařezávání natlakovanou vodou. Rozdíl představuje nalezení více prvků na struktuře usazeného ethylen vinyl acetátu. Přítomnost křemíku na usazenině se dá vysvětlit opracováváním, kterým byl modul upraven před provedením měření, kdy došlo k tvorbě mikroskopických střepek na povrchu, které se nepodařilo očistit a které byly následně odebrány z povrchu modulu. Přítomnost ostatních kovů, hliníku a niklu, se dá opět vysvětlit opracováváním modulu. Modul byl velikostně upraven pomocí diamantové kotoučové brusky a je velmi pravděpodobné, že zjištěné stopové množství na vzorku je výsledek znečištění předchozího řezání či samotného diamantového kotouče.

6. ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo seznámit se s problematikou recyklace fotovoltaických modulů v České republice a zahraničí. Dále bylo cílem studovat a vyhodnotit na vhodně upravených vzorcích vlivy rozpouštědel a v klimatické komoře otestovat vlivy různých klimatických podmínek. Byla provedena teoretická rešerše, ve které je zahrnut princip fungování solárních modulů, typy solárních modulů, metody jejich výroby a recyklace a legislativa v České republice a Evropské unii s těmito procesy spojená. Dále byl popsán stav recyklace fotovoltaických modulů v české republice a v nejvýznamnějších zemích, které solární moduly využívají.

Klimatickými testy na vzorcích tenkovrstvého solárního modulu jsem byl schopen určit hodnotu dostatečnou pro roztavení ethylen vinyl acetátové vrstvy a to 340 °C. Testováním projevů vysokých teplot v různých atmosférách se prokázalo, že za využití dusíkové atmosféry je možno dosáhnout stejného výsledku s menšími poměry destrukce a množstvím škodlivých zplodin. Testováním rozpouštědel byly zjištěny hodnoty nasákavosti modulu pro aceton, isopropyl alkohol a destilovanou vodu. U těchto rozpouštědel nebyl pozorován vliv na mechanické či termické vlastnosti ethylen vinyl acetátu. Elektronovou mikroskopií a spektrometrií bylo potvrzeno, že v případě, kdy nedojde během tavení k hoření, dojde k vypaření a následnému částečnému usazování ethylen vinyl acetátu. Spolu s uhlíkem bylo nalezeno stopové množství jiných materiálů, které se povedlo určit jako znečištění vzniklé úpravou modulu.

LITERATURA

- [1] *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2012/19/EU ze dne 4. července 2012 o odpadních elektrických a elektronických zařízeních (OEEZ)*. In: . 2012, ročník 2012, číslo 19. Dostupné také z: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/CS/TXT/?uri=CELEX%3A32012L0019>
- [2] *Zákon č. 185/2001 Sb.: Zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů*. In: . 2001, ročník 2001, číslo 185. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2001-185>
- [3] *Vyhláška č. 352/2005 Sb.: Vyhláška o podrobnostech nakládání s elektrozařízeními a elektroodpady a o bližších podmínkách financování nakládání s nimi (vyhláška o nakládání s elektrozařízeními a elektroodpady)*. In: . ročník 2005, číslo 352. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2005-352>
- [4] *Zákon č. 165/2012 Sb.: Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů*. In: . 2012, číslo 165. Dostupné také z: <https://www.zakonyprolidi.cz/cs/2012-165>
- [5] *Zákon č. 165/2012 Sb.: Zákon o podporovaných zdrojích energie a o změně některých zákonů*. In: . ročník 2012, číslo 165. Dostupné také z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/solarni_panely_legislativa/\\$FILE/ODP-zakon_165_2012-20130624.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/solarni_panely_legislativa/$FILE/ODP-zakon_165_2012-20130624.pdf)
- [6] *Provozovatelé kolektivních systémů se souhlasem pro zajištění financování nakládání s elektroodpady a s historickými elektrozařízeními*. Ministerstvo životního prostředí [Internet]. [citováno 14. prosince 2020]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kolektivni_systemy_oeez/\\$FILE/ODP-kolektivni_systemy_kontakty-20202805.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/kolektivni_systemy_oeez/$FILE/ODP-kolektivni_systemy_kontakty-20202805.pdf)
- [7] *BECHNÍK, Bronislav. Firmy nabízející recyklaci fotovoltaických panelů*. Tzbinfo [Internet]. 27.6.2013 [citováno 14. prosince 2020]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/10086-firmy-nabizejici-recyklaci-fotovoltaickych-panelu>
- [8] *BECHNÍK, Bronislav. Firmy nabízející recyklaci fotovoltaických panelů*. Tzbinfo [Internet]. 27.6.2013 [citováno 14. prosince 2020]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/10086-firmy-nabizejici-recyklaci-fotovoltaickych-panelu>
- [9] *Press Release #16: German Net Electricity Generation in First Half of 2020: Renewables Reach Record Share of 55.8 Percent*. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE [online]. 1. červen 2020 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: [https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2020/net-energy-production-first-half-of-2020.html#:~:text=136.1%20TWh%20in%20the%20first,to%202019%20\(47%20percent\).](https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2020/net-energy-production-first-half-of-2020.html#:~:text=136.1%20TWh%20in%20the%20first,to%202019%20(47%20percent).)
- [10] *WEHRMANN, Benjamin. Resources and recycling needs for Germany's solar panels*. Clean Energy Wire CLEW [online]. 11. únor 2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/resources-and-recycling-needs-germanys-solar-panels>

- [11] SURESH, Sangeetha, Surbhi SINGHVI a Vinay RUSTAGI. *Managing India's PV Module Waste*. BRIDGE TO INDIA [online]. 2009, 2019 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://bridgetoindia.com/backend/wp-content/uploads/2019/04/BRIDGE-TO-INDIA-Managing-Indias-Solar-PV-Waste-1.pdf>
- [12] WALTON, Justin. *The 5 Countries That Produce the Most Solar Energy*. Investopedia [online]. 1999, 9. Duben 2021 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/articles/investing/092815/5-countries-produce-most-solar-energy.asp>
- [13] WESOFF, Eric a Becky BEETZ. *Solar panel recycling in the US — a looming issue that could harm industry growth and reputation: The solar industry cannot claim to be a clean energy source if it leaves a trail of hazardous waste*. Pv magazine USA [online]. 3. prosinec 2020 [cit. 2021-5-15]. Dostupné z: <https://pv-magazine-usa.com/2020/12/03/solar-panel-recycling-in-the-us-a-looming-issue-that-could-harm-growth-and-reputation/>
- [14] ZELENÁ ELEKTRINA OD ČEZ: 100% z obnovitelných zdrojů. Skupina ČEZ [Internet]. [citováno 13. prosince 2020]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/elektrina/zelena-elektrina>
- [15] ZELENÁ ENERGIE SKUPINY ČEZ PODPORUJE ROZVOJ OBNOVITELNÝCH ZDROJŮ. Skupina ČEZ [Internet]. 27. Prosinec 2005 [citováno 13. prosince 2020]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/pro-media/tiskove-zpravy/zelena-energie-skupiny-cez-podporuje-rozvoj-obnovitelných-zdroju-51338>
- [16] Prvkové složení fotovoltaických panelů. Praha, 2015. Bakalářská práce. Univerzita Karlova v Praze Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce RNDr. Ondřej Šebek, Ph.D.
- [17] BECHNÍK, Bronislav. *Recyklace fotovoltaických panelů na konci životnosti*. Tzb info [Internet]. 26. Září 2011 [citováno 13. prosince 2020]. Dostupné z: [https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaiika/7868-recyklace-fotovoltaiických-panelu-na-konci-zivotnosti](https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/7868-recyklace-fotovoltaiických-panelu-na-konci-zivotnosti)
- [18] LUNARDI, Marina, Juan ALVAREZ-GAITAN, José BILBAO a Richard CORKISH. *A Review of Recycling Processes for Photovoltaic Modules*. IntechOpen [Internet]. 15. Únor 2018 [citováno 13. prosince 2020]. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.74390
- [19] JAHODA, Jakub. *Charakteristika metod recyklace použitých fotovoltaických článků*. Ostrava, 2013. Bakalářská práce. VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA Hornicko-geologická fakulta. Vedoucí práce Mgr. Eva Pertile, PhD.
- [20] R. Murison et al., "CIGS P1, P2, and P3 laser scribing with an innovative fiber laser," 2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, HI, 2010, pp. 000179-000184, doi: 10.1109/PVSC.2010.5614550.
- [21] Vaněk, J.; Křivík, P.; Novák, V. *Alternativní zdroje energie*. Brno, skripta FEKT. 2006

- [22] Bechník B. *Historie a perspektivy OZE - fotovoltaika, méně rozšířené technologie* [Internet]. TZB-info. 2009 [citován 10. prosinec 2020]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/fotovoltaika/5517-historie-a-perspektivy-oze-fotovoltaika-mene-rozsirene-technologie>
- [23] [Comparison] *Monocrystalline vs Polycrystalline Solar Panels* [Internet]. Solar Magazine. 2020 [citován 11. prosinec 2020]. Dostupné z: <https://solarmagazine.com/solar-panels/monocrystalline-vs-polycrystalline-solar-panels/>
- [24] Lane C. *Amorphous Silicon Solar Panels* [Internet]. Solar Reviews. 2020 [citován 11. prosinec 2020]. Dostupné z: <https://www.solarreviews.com/blog/amorphous-silicon-solar-panels>
- [25] Burgess D. *thin-film solar cell | Definition, Types, & Facts* [Internet]. Encyclopedia Britannica. [citován 11. prosinec 2020]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/thin-film-solar-cell>
- [26] Petrlik J, Válek P. *kadmium* [Internet]. [citován 11. prosinec 2020]. Dostupné z: <https://arnika.org/kadmium>
- [27] D. Crisp; A. Pathare; R. C. Ewell (2004). "The performance of gallium arsenide/germanium solar cells at the Martian surface". *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. 54 (2): 83–101. Bibcode:2004AcAau..54...83C. doi:10.1016/S0094-5765(02)00287-4.
- [28] BUSHONG, Steven. *What kind of solar panels does NASA use?* *Solar Power World* [Internet]. 11. Březen 2016 [citováno 12. prosince 2020]. Dostupné z: <https://www.solarpowerworldonline.com/2016/03/kind-solar-panels-nasa-use/>
- [29] HARPER, Gavin. *CIGS solar cell*. Britannica [Internt]. [citováno 12. prosince 2020]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/CIGS-solar-cell>
- [30] CIS = CIGS & CIGSe: CIS – Black gold for supplying tomorrow's energy. *Solteature* [online]. [citováno 12. prosince 2020]. Dostupné z: <http://www.solteature.com/technology/cis-cigs-cigse.html>
- [31] *Organic Photovoltaics*. Merck [Internet]. [citováno 12. prosince 2020]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/materials-science/organic-electronics/opv-tutorial.html>
- [32] *Donor Materials*. Merck [Internet]. [citováno 12. prosince 2020]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=107237373>
- [33] *Fullerene Acceptor Materials*. Merck [Internet]. [citováno 12. prosince 2020]. Dostupné z: <https://www.sigmaaldrich.com/materials-science/material-science-products.html?TablePage=107237374>
- [34] Chen, Yongsheng; Cao, Yong; Yip, Hin-Lap; Xia, Ruoxi; Ding, Liming; Xiao, Zuo; Ke, Xin; Wang, Yanbo; Zhang, Xin. [citováno 12. prosince 2020]. "Organic and solution-processed tandem solar cells with 17.3% efficiency". *Science*. 361 (6407): 1094–1098. Bibcode:2018Sci...361.1094M. doi:10.1126/science.aat2612. ISSN 0036-8075. PMID 30093603.

- [35] *Výroba fotovoltaických článků a panelů. Solartec [Internet]. [citováno 12. prosince 2020]. Dostupné z:*
<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k41.htm>
- [36] *POULEK, Vladislav a Martin LIBRA. Konstrukce a výroba fotovoltaických článků a panelů. Elektro [Internet]. 2010, Březen 2010, 2010(3) [citováno 12. prosince 2020]. Dostupné z:*
<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/konstrukce-a-vyroba-fotovoltaickych-clanku-a-panelu--10310>
- [37] *What are the technologies and their respective manufacturing process? PVinsights [Internet]. [citováno 13. prosince 2020]. Dostupné z:*
<http://pvinsights.com/Knowledge/Technology.php>
- [38] *SVARC, Jason. Clean Energy Reviews. Clean Energy Reviews [online]. 20. březen 2020 [cit. 2021-5-19]. Dostupné z:*
<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/solar-panel-components-construction>
- [39] *WHELAN, A. a Tony WHELAN. Polymer Technology Dictionary [online]. Springer Science & Business Media, 1994 [cit. 2021-5-13]. ISBN 9780412581809. Dostupné z:*
https://books.google.cz/books?id=7Qq_vknrP4kC&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [40] *McKeen, Laurence W. Permeability Properties of Plastics and Elastomers (3rd Edition). Elsevier [Internet]. 2012 [citováno 13. května 2021] Dostupné z:*
<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt009IL4G2/permeability-properties/ethylene-vinyl-acetate>
- [41] *What is an EVA foam and its common uses? [online]. 2015 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z:* <https://foamsealant.com.au/what-is-an-eva-foam-and-its-common-uses/#:~:text=EVA%20is%20used%20to%20give%20plastic%20wrap%20its%20%E2%80%9Cclinginess.%E2%80%9D&text=EVA%20emulsions%20are%20developed%20into,metal%20surfaces%2C%20and%20coated%20papers.&text=EVA%20is%20used%20with%20wax,and%20top%20notch%20soccer%20cleats>.
- [42] *DE ROOJI, Dricus. EVA (ethylene vinyl acetate) Film: composition and application. Sinovoltaics [online]. 2009 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z:*
<https://sinovoltaics.com/learning-center/materials/ethylene-vinyl-acetate-eva-film-composition-and-application/>
- [43] *BROGLY, M., M. NARDIN a J. SCHULTZ. Effect of vinylacetate content on crystallinity and second-order transitions in ethylene-vinylacetate copolymers. Journal of Applied Polymer Science. 1998, 64(10), 1903-1912. ISSN 1097-4628.*
- [44] *DOI, Takuya, Izumi TSUDA a Hiroaki UNAGIDA. Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. Solar Energy Materials and Solar Cells. 2001, 67(1-4), 397-403. ISSN 0927-0248.*

ZDROJE OBRÁZKŮ

- 2.1 https://www.elektrina.cz/web/data/images/big/article_solarni-panely-znicene.jpg
- 3.1 http://www.sticka.cz/user/10774/upload/ftp_client/struktura.png
- 3.2 <http://cz.jensyssolar.com/Content/upload/2019289553/201901052230368192682.jpg>
- 3.3 https://cdn.myshoptet.com/usr/www.battery-import.cz/user/shop/big/122318_victron-solarni-panel-330w-24v--polykrystalicky.jpg?5eba8c1c
- 3.4 https://hog-media.com/images/max600x600/?pathAndFilename=/11323/Image_1200x1200/im1200_b110990.jpg
- 3.5 https://solarsystem.nasa.gov/system/content_pages/main_images/1057_1057_rover2_768.jpg
- 3.6 <https://www.sigmaaldrich.com/content/dam/sigma-aldrich/materials-science/organic-electronics/bilayer-organic-photovoltaic-device.jpg>
- 3.7 https://images.squarespace-cdn.com/content/v1/5354537ce4b0e65f5c20d562/1534767395064-IPST0MNXEZGKV5U5V674/ke17ZwdGBToddI8pDm48kPo8HQo1-ZIolm1FTbIbChJZw-zPPgdn4jUwVcJE1ZvWQUxwkmyExglNqGp0IvTJZamWLI2zvYWH8K3-s_4yszcp2ryTI0HqTOaaUohrI8PIE0U1ApFKQB2CWM96X7vlnEAu2rZ1dFSv1KS L5ebcSeA/Solar+Panel+assembly+construction+components.png?format=750w